



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE GEOGRAFÍA AMBIENTAL

PELIGRO POR INUNDACIÓN DE TSUNAMI
EN LA COSTA DE OAXACA
(MUNICIPIOS DE SANTIAGO PINOTEPA
NACIONAL Y SANTA MARÍA HUAZOLOTITLÁN)

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T A

KAREN BIBIANA CHANG MARTÍNEZ

ASESORA: DRA. MARÍA TERESA RAMÍREZ HERRERA
CO-ASESOR: M. EN C. JOSE ANTONIO NAVARRETE PACHECO

MORELIA, MICHOACÁN

OCTUBRE, 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE GEOGRAFÍA AMBIENTAL

PELIGRO POR INUNDACIÓN DE TSUNAMI
EN LA COSTA DE OAXACA
(MUNICIPIOS DE SANTIAGO PINOTEPA
NACIONAL Y SANTA MARÍA HUAZOLOTITLÁN)

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T A

KAREN BIBIANA CHANG MARTÍNEZ

ASESORA: DRA. MARÍA TERESA RAMÍREZ HERRERA
CO-ASESOR: M. EN C. JOSE ANTONIO NAVARRETE PACHECO

MORELIA, MICHOACÁN

OCTUBRE, 2012

AGRADECIMIENTOS

La presente tesis representa un gran logro académico, por lo que agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Licenciatura de Ciencias Ambientales, por la preparación que he recibido durante el periodo 2007-2010 -

Agradezco a las instituciones, que me han brindado apoyo durante este proceso de formación académica y de elaboración de mi trabajo final de tesis. Agradezco, a la beca PFEL, brindada por la institución, como un apoyo durante mis estudios. Así como a la beca que recibí para la elaboración de mi tesis del proyecto PAPIIT IN123609. Por último, también quisiera agradecer al proyecto SEP-CONACYT Ciencia Básica 129456, en el cual, pude participar y aprender en gran medida, fortaleciendo mi formación.



*Dedico esta tesis principalmente a mis amados padres,
Martha Elena Martínez Hernández y Alfonso Chang Moreno,
Que han sido mi mayor ejemplo y admiración,
Agradezco su paciencia y cariño durante toda mi formación,
Tanto académica, como personal.
Agradezco que me hayan motivado a seguir mis sueños
y esforzarme por alcanzarlos.
Es para mí un gran honor mostrarles
Este trabajo concluido.*

*Quiero agradecer a mis hermanos,
Laura, Tania y Alfonso, Que han sido ejemplo
y motivación para mí en más de un momento.
Por su cariño, compañía y regaños.*

*A Luis Ramírez, por su comprensión
y apoyo incondicional durante este proceso,
Además de su ayuda para la elaboración de esta tesis.
A mis amigos, que me acompañaron, alentaron
y que son un apoyo fundamental.*

*De igual manera, quisiera agradecer a
María Teresa Ramírez Herrera, mi asesora de tesis,
Quien con paciencia me instruyo, motivo e hizo aprender mucho.
A mi coa-asesor, José Antonio Navarrete Pacheco, quien amable y abiertamente,
me enseñó todo lo necesario para completar mi tesis.
A mis sinodales que han ayudado a que este sea un mejor trabajo
A Omar Peña Ruíz, María Ortuño, Federico Olivo por su ayuda y compañía en
campo para realizar las mediciones necesarias.*

*Por último, Quisiera agradecer a mis mascotas, a Narnaki,
quien es irremplazable, fue un compañero ejemplar gran parte de mi vida,
A mi cuyita que también me acompañó en mis desvelos,
Y con su compañía me motivaba a seguir.
Y a mis dos perritas, que siempre me alegran la vida.*



RESUMEN

La naturaleza siempre ha presentado fenómenos de gran intensidad, que llegan a convertirse en grandes catástrofes para la sociedad. La importancia de su estudio es esencial para la población y para el entendimiento de su interacción con el ambiente. En este trabajo, se hace énfasis en los tsunamis, un fenómeno poco estudiado en México. En su mayoría, los grandes tsunamis son producidos por terremotos. En México, la mayoría de estos terremotos son originados por la zona de subducción del Pacífico Mexicano. El estado de Oaxaca es un claro ejemplo de los efectos de la zona de subducción, ya que presenta aproximadamente el 25% de los sismos de todo el país. Debido a esto y al registro histórico de tsunamis, en el que se incluye la ocurrencia de un gran tsunami en 1787 en esta zona, se escogió la costa de Oaxaca para analizar el peligro de inundación por tsunami.

Se planteó como hipótesis que debido a la historia sísmica y de tsunamis en Oaxaca, así como su ubicación respecto a la zona de subducción mexicana y su composición geomorfológica, la hacen una zona susceptible a ser inundada por la ocurrencia de un tsunami.

El objetivo principal de este trabajo es determinar las zonas con peligro de inundación mediante 3 factores principales, que pueden ser determinantes para la inundación por un tsunami: La geomorfología, la elevación, y la distancia a la línea de costa, sin embargo, la geomorfología es la variable a la que le prestó mayor atención. Se realizó una clasificación geomorfológica de la zona, y con ayuda de las herramientas de percepción remota y sistemas de información geográfica (SIG) se creó un mapa geomorfológico. Con base en este mapa, se clasificaron las geoformas en 3 categorías de peligro (alto, medio y bajo), del cual se generó un primer mapa de peligro basado únicamente en la geomorfología. Posteriormente, a este mapa se incorporaron las variables de la elevación por geoforma y la distancia a la línea de costa, para la creación del mapa de peligro final. La distancia a la línea de costa se obtuvo de

imágenes satelitales y el uso del SIG , y la elevación de un modelo digital de elevación (MDE). El mapa de peligro final presenta cuatro categorías: muy elevado, elevado, medio, bajo o nulo; representados en rojo, amarillo, verde y azul respectivamente. El mapa final de peligro permite una fácil distinción de las áreas con las diferentes clases de peligro de inundación y la ubicación de las poblaciones, así como las vías de comunicación. Esto último, se incorporó al mapa de peligro, con la finalidad de que posteriormente sirva para desarrollar un mapa con rutas de evacuación.

Además de la contribución académica, el presente trabajo tiene el propósito resaltar la importancia de la realización este tipo de estudios. Estas investigaciones son novedosas en México. Este mapa de peligro y la información generada, están dirigidos a los habitantes de la zona, y al sector científico, interesado así como a las instituciones gubernamentales que consideren este tipo de fenómenos en el ordenamiento del territorio y la conservación de áreas naturales.

Los resultados muestran que más de la mitad del área de estudio se encuentra en la categoría de peligro alto, incluso hasta aproximadamente 4 km tierra dentro. Se observa también que geoformas con elevación escasa (aproximadamente 10m) y cercana al mar, son las geoformas que presentan mayor peligro en caso de inundación tsunami, junto con los cordones litorales, planicies costeras y de inundación, así como geoformas con conexión al mar, en donde se encuentran los esteros y la laguna. Estas últimas geoformas, no solo tienen un peligro elevado, sino que también propagan las ondas del tsunami tierra dentro, son áreas que deben ser evitadas en caso de que un gran tsunami entre a la costa. Por otro lado, a lo largo de la costa identificaron lomeríos medianos y grandes zonas que se pueden considerar seguras, y a donde se puede acudir en caso de la ocurrencia de un tsunami.

ABSTRACT

The history of nature is full of natural events great intensity that often become great disasters to society. The importance of their study is essential for the population and the understanding of their interaction with the environment. In this work, we focus on tsunamis, which are phenomenon that have been scarcely studied in Mexico.

Most of the major tsunamis are caused by earthquakes. In México, most of these earthquakes and their tsunamis occur along the Mexican subduction zone. The Pacific coast of Oaxaca is a clear example of the effects of subduction zone's seismicity. Approximately 25% of the earthquakes in all the country occur here. Because of this, the historical record of tsunamis, which includes a large tsunami in 1787, and the local geomorphology, the coast of Oaxaca was chosen to analyze the hazard by tsunami inundation.

The main objective of this study is to determine tsunami inundation hazard by means of three main factors: the local geomorphology, elevation, and distance to the coastline. However, the geomorphology factor was given a higher weight. A geomorphologic classification of the zone was developed with the aid of remote sensing and geographic information system (GIS) tools, to generate a geomorphology map. Based on this map, landforms were classified into three categories for tsunami hazard (high, medium, and low hazard), which generated a first tsunami hazard map based solely on geomorphology. Subsequently, landform elevation and distance to the coastline were integrated in the analysis to generate a final tsunami inundation hazard map (TIHM). The distance to the coastline from any analyzed site was obtained by means of satellite images interpretation and GIS, and the elevation was obtained from a MDE. The ultimate TIHM has four categories: very high, high, medium, and low or zero hazard, shown in red, yellow green and blue respectively. The final map allows for easy distinction of the areas of most hazard to tsunami inundation, the location of populations,

and roads. The latest were incorporated in order to further develop an evacuation route map.

Our results show that more than half of the study area is at high risk of tsunami inundation, even up to 4km inland, in the worst scenario. Results also show that the low elevation landforms (approx. 10m) and proximity to the sea, such as beaches, coastal plains, and landforms in connection with the sea, marshes and lagoons, are at a higher hazard of tsunami inundation. The lagoon, estuaries and marshes tend to propagate the tsunami waves inland, and are areas that should be avoided in case of a large tsunami. Furthermore, along the coast were identified medium to high hills, which can be considered as potentially safe areas in case of tsunami.

The present work aimed to promote the importance of this type of study. This research is novel in Mexico. This hazard map and the information generated are addressed to the local population and the scientific sector, as well to the government institutions that should consider these initial results for further land management and conservation of natural areas.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	VI
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 JUSTIFICACIÓN	19
1.2 HIPÓTESIS	21
1.3 OBJETIVO	21
2. ZONA DE ESTUDIO	22
2.1 Localización	23
2.2 Tectónica	24
2.3 Vegetación y uso del suelo	24
2.4 Clima	24
2.5 Composición social y económica.	24
2.6 Historia- El gran tsunami en Oaxaca de 1787	26
3. MARCO TEORICO	29
3.1 Tsunamis	29
3.1.1 Antecedentes	29
3.1.2 Origen	31
3.1.3 Tipos de tsunamis según su distancia a la fuente de origen.	32
3.1.4 Características de un tsunami.	33
3.1.5 Impacto por tsunami	35
3.1.6 Propagación de un tsunami	36
3.1.7 Resonancia generada por tsunamis	37
3.1.8 Estudio de los tsunamis.	38
3.2 Geomorfología general y Costera	39
3.2.2 La Zona Costera	39
3.2.3 Procesos de formación de la zona costera.	40
3.2.4 Geoformas costeras	41
4. METODOLOGÍA	42
4.1 Percepción Remota	42
4.1.1 Obtención de Imágenes del área de estudio mediante Google Earth	43
4.2 Sistemas de información geográfica (SIG)	44
4.2.1 Delimitación del área de estudio	45
4.2.2 Elaboración de un mapa geomorfológico de la zona de estudio mediante SIG	48

4.3. Modelo Digital de Elevación (MDE)	49
4.4 Elaboración de un mapa de peligro mediante el mapa geomorfológico y el MDE	50
4.5 Perfil topográfico de campo	53
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
6. CONCLUSIÓN	79
<input type="checkbox"/> ANEXO 1 – CARACTERÍSTICAS DE UN TSUNAMI	80
<input type="checkbox"/> ANEXO 2 – GEOFORMAS DE LA ZONA COSTERA	84
<input type="checkbox"/> BIBLIOGRAFÍA	90

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1 Convergencia de las placas tectónicas que afectan México y centro América.....	16
Figura 2 Ubicación de la zona de estudio en Oaxaca, México	17
Figura 3 Sismicidad en la parte sur de México desde 1990 al presente (INEGI, 2011).....	18
Figura 4. Mapa del área de estudio.....	23
Figura 5. Ganadería de la región	25
Figura 6. Lancha de pescadores de Corralero, Oaxaca.	25
Figura 7. Imagen satelital donde se muestran las ciudades donde hay reportes de que fueron afectadas por el tsunami originado por el sismo de "San Sixto", en rojo los municipios donde se encuentra el área de estudio (Google Earth, 2011).	27
Figura 8. Mapa de México donde se representa la modelación de Núñez et. al 2008 para las alturas del tsunami provocado por el sismo de "San Sixto" (Núñez et al., 2008).....	28
Figura 9. Propagación de las ondas de tsunamis generadas por el terremoto en Indonesia 2004 (NOOA, 2011).	30
Figura 10. Formación de un tsunami debido a un movimiento tectónico (UNESCO, 2011).....	31
Figura 11. Propagación de ondas por tsunami (http://wattsupwiththat.com/2010/02/27/tsunami-threat-for-hawaii/).....	33
Figura 12. Terminología de las características de un tsunami al llegar a la zona costera (Levin y Nosov, 2009).	34
Figura 13. Llegada de un tsunami a la costa (USGS, 2011).....	35
Figura 14. Carta de propagación de la onda del tsunami de Papua Nueva Guinea, ocurrido en julio de 1998. Las isocronas muestran a intervalos de 30 minutos el tiempo de avance del frente de onda (NOOA, 2011).	37
Figura 15. Delimitación del área de estudio, se muestra en ArcView, software utilizado	46
Figura 16. Mapa del área de estudio en Oaxaca, México.....	47
Figura 17. Categorías de peligro generadas mediante límites degradados.....	53
Figura 18. Perfiles topográficos cerca de la laguna Corralero, Google Earth, 2012.....	54
Figura 19. Toma de puntos en el perfil topográfico.....	55
Figura 20. Porcentajes de las unidades geomorfológicas en el área de estudio	57
Figura 21. Perspectiva oblicua de la planicie aluvial entre lomeríos. Imagen satelital obtenida en Google Earth, con exageración en la escala vertical de 2 veces la real.	58
Figura 22. Perspectiva oblicua de los lomeríos localizados al norte de la laguna. Imagen satelital obtenida de Google Earth, con exageración en la escala vertical de 2 veces la real.	58
Figura 23. Cordones litorales 1 km de distancia de la costa	59
Figura 24. Cordones litorales cercanos a la línea de costa	59
Figura 25 . Perspectiva oblicua de una sección del río que está rodeada por planicie de inundación Imagen satelital obtenida en Google Earth, con exageración en la escala vertical de 2 veces la real.	60
Figura 26. Vista de la laguna en foto satelital vertical obtenida de Google Earth en mayo de 2012	61
Figura 27. Vista de la laguna en planta, cerca de su desembocadura	61
Figura 28 Pantano con mangles	62
Figura 29. Marisma salina a las orillas de un pantano	63
Figura 30. Sección de la barra que se encuentra entre la laguna y el mar	64
Figura 31. En amarillo se marcan los perfiles topográficos que se realizaron a ambos lados de la laguna (imagen satelital, Google Earth, 2012).....	66
Figura 32. Perfil topográfico 1	67
Figura 33. Perfil Topográfico 2	68
Figura 34. Caminos en malas condiciones del área de estudio.....	77
Figura 35. Viviendas de Corralero, Oaxaca. Comunidad a la orilla de la laguna	77
Tabla 1. Magnitud y Run-up de los más grandes tsunamis registrados (NOOA, 2011).....	29
Tabla 2. Tipo de peligro por geoforma	51
Tabla 3 Proceso de formación de las geoformas del área de estudio	56
MAPA 1. Geomorfología de la zona de estudio, en Oaxaca, México	65
MAPA 2. Peligro por inundación de tsunami en la Costa de Oaxaca, México	71

1. INTRODUCCIÓN

En la historia de la Tierra siempre han estado presentes fenómenos naturales como sismos, volcanes, ciclones, avalanchas, etc., los cuales se caracterizan por liberar una extraordinaria cantidad de energía en un periodo relativamente corto, además de presentar un carácter repentino y muchas veces impredecible (unescoLugo y Inbar, 2002).

Hoy en día, los fenómenos naturales causan graves daños en cuanto a pérdidas humanas y económicas e incluso alteraciones significativas al ambiente. En consecuencia, dichos sucesos son considerados desastres naturales, provocando una larga cadena de cambios, tanto sociales como ambientales, que se prolonga por un tiempo indefinido (Lugo e Inbar, 2002).

Un desastre natural es definido como un proceso o evento con efectos negativos, donde la sociedad, o una porción de está, sufren en gran medida y extensión daños (Ferrando, 2003). Tales daños son representados como pérdidas de vidas, desajustes en la estructura social, administrativa y política, obligando a la población a que abandone sus actividades básicas corto, mediano y largo plazo. Todo esto afecta el buen funcionamiento del sistema social, que se deriva de la baja capacidad para lidiar con este tipo de emergencias, además de la afectación parcial o total de su ambiente natural (CENAPRED, 2001; Ferrando, 2003; Lugo y Inbar, 2002).

En todo el mundo, ocurren fenómenos naturales con potencial de desastre, sin embargo, su impacto es mayor en países en vías de desarrollo, principalmente por dos factores. El primero refiere a que las zonas de países subdesarrollados se ven altamente afectadas por actividad volcánica, sísmica, inundaciones, entre otros, debido a su ubicación geográfica y a su configuración geológica y geomorfológica (Alcántara-Ayala, 2002). Por otro lado, el bajo o medio desarrollo económico, social y político los hacen vulnerables a los desastres naturales. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la recuperación de los desastres naturales (UNDRO, por sus

siglas en inglés) entre 1900 y 1979 las regiones menos desarrolladas de América Latina, Asia y África concentraron más del 90% de la población afectada en diversos tipos de desastres naturales (UNDRO, 1979).

Este trabajo se centra en el peligro de inundación por tsunamis generados por sismos, un fenómeno natural considerado también como uno de los desastres naturales que produce mayores daños, por la gran energía que involucra. Fenómenos como este pueden transformar al paisaje fuertemente, (suelos, geomorfología, flora, fauna, etc.). La mejor forma de su manejo y prevención, consiste en conocer cómo y bajo qué circunstancias actúan (Ferrando, 2003).

Peligro por tsunami

En México, es necesario realizar evaluación de peligro por inundación de tsunamis en las zonas costeras, donde se alberga gran parte la población del país (Dehays-Rocha, 2002). La definición que utilizaremos, será la de peligro natural, debido a que es un peligro generado por un fenómeno natural. Muchos de estos fenómenos naturales son predecibles, es decir, que se espera que sucedan y que no pueden ser controlados (Dehays-Rocha, 2002).

Existen varias definiciones de peligro, en esta tesis se combinan dos definiciones de peligro natural, altamente consensadas. La primera establece que el peligro es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural con un potencial de causar un desastre durante cierto tiempo y en un espacio definido (UNDRO, 1979). La segunda define al peligro natural como cualquier fenómeno que puede causar la pérdida de vidas, de la propiedad, pérdida de los medios de subsistencia, trastornos sociales y económicos, o daños al medio (UNISDR, 2009). La definición de la UNDRO se enfoca en el aspecto físico, mientras que la dada por la UNISDR (2009) se refiere a pérdidas humanas y no hace referencia a un periodo determinado.

En este estudio, se considera peligro natural como la ocurrencia de un proceso natural con potencial de convertirse en desastre en un sitio dado. Por lo que el peligro de inundación por tsunami, es entonces, el potencial de desastre por inundación generado por un tsunami en un espacio dado.

Se excluyó el carácter temporal que señala la UNDRO (1979) porque requiere un análisis de la física del fenómeno y la frecuencia con la que se presenta un tsunami. Los tsunamis son poco recurrentes y a pesar de no tener su frecuencia, se sabe que donde han sucedido, volverán a ocurrir (Andrade et al., 2010; Lagos y Cisternas, 2004).

Los datos de antiguos tsunamis (históricos y paleotsunamis) pueden ayudar a cuantificar estos factores para la mayoría de las comunidades. Sin embargo, los datos son muy limitados (UNESCO, 2008).

El peligro por tsunami se puede analizar espacialmente, por medio de la cartografía del área de inundación. Mediante un mapa de peligro se pueden reconocer zonas de posible inundación por tsunami, así como el reconocimiento de rutas de evacuación y sistemas de alerta (Cumminis et al., 2008).

Antecedentes de la zona de estudio.

Las condiciones topográficas y geológicas en Latinoamérica favorecen en gran medida la ocurrencia de fenómenos naturales, tales como terremotos y tsunamis (Dehays-Rocha, 2002; Lugo y Inbar, 2002). Esto es debido a que varios de los países de esta región se ubican en zonas de subducción donde convergen las placas tectónicas (Figura 1).



Figura 1 Convergencia de las placas tectónicas que afectan México y centro América

Incluso en México esto no es una realidad desconocida, ya que ha sufrido una gran cantidad de fuertes terremotos seguidos por tsunamis de diferentes magnitudes. Esto se debe a que México se encuentra en una de las zonas sísmicas más activas en el hemisferio occidental, donde interactúan 5 placas tectónicas: La placa de Norteamérica, placa de Cocos, placa del Pacífico, la placa de Rivera y la placa del Caribe.

En México, los datos instrumentales sobre tsunamis datan desde 1952, donde se tiene registrado que en el siglo pasado han ocurrido aproximadamente 40 sismos con una magnitud >7 , de los cuales al menos 14 han producido tsunamis de entre 2 y 11 metros aproximadamente. Sin embargo, datos históricos indican que por lo menos 50 tsunamis han alcanzado las costas del Pacífico Mexicano desde 1732 (Farreras y Sánchez, 1991).

La zona de estudio se localiza en el estado de Oaxaca, incluye 2 municipios de la costa: Santa María Huazolotitlán y Santiago Pinotepa Nacional (Figura 2), los cuales juntos representan el 1.1 % de la superficie del estado con una población de 54 680

habitantes (INEGI, 2011). La zona de estudio tiene una superficie de 305.34 km² y se extiende a lo largo de la línea de costa.



Figura 2 Ubicación de la zona de estudio en Oaxaca, México

El estado de Oaxaca registra aproximadamente el 25% de los sismos del país, es uno de los que posee mayor sismicidad en la República Mexicana. Esta alta tasa de sismicidad se debe al contacto convergente entre las placas de Cocos, la cual subduce bajo la placa de Norteamérica.

En Oaxaca se tiene registro en archivos históricos de varios sismos importantes, entre ellos se encuentran los siguientes: el de 1665 con Ms <7.5, el sismo de 1740 con Ms <8 y el mayor en 1787 con un Ms 8.4, este último, es conocido como “San Sixto” (Núñez et al., 2008). Actualmente, el registro instrumental representa alta sismicidad en Oaxaca (Figura 3).

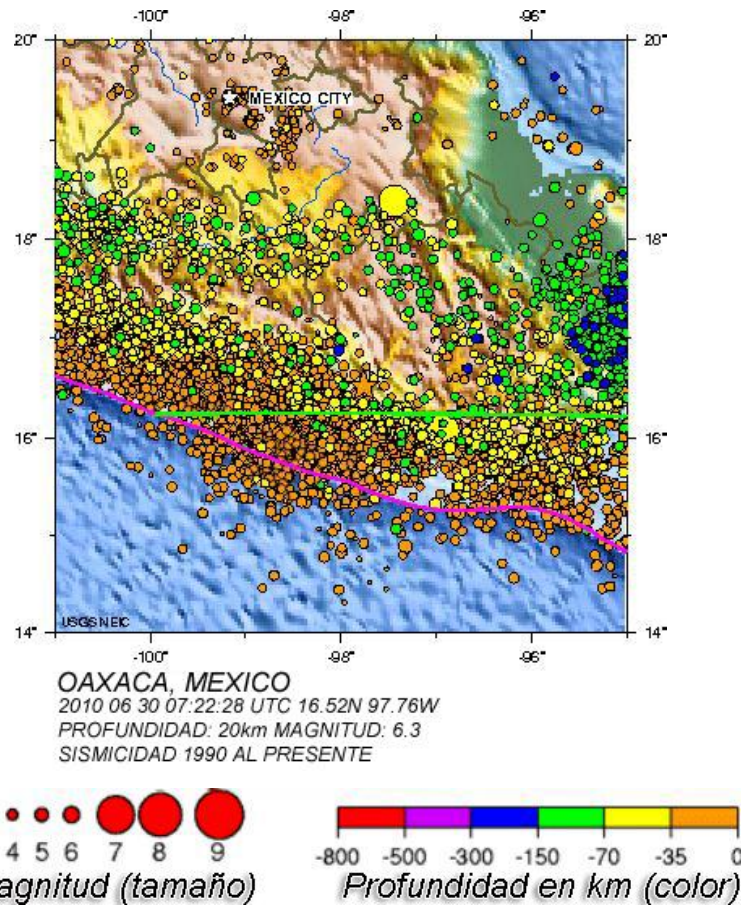


Figura 3 Sismicidad en la parte sur de México desde 1990 al presente (INEGI, 2011).

Con base en la información tanto histórica como reciente se ha planteado que la costa de Oaxaca puede presentar en un futuro la ocurrencia de un tsunami con gran potencial destructivo. La fuerza del impacto dependerá de varios factores, por esta razón se analizaron tres variables que determinan en gran medida el daño por un tsunami: la geomorfología y la evaluación de la altura y distancia a la línea de costa.

1.1 JUSTIFICACIÓN

En México, el estudio del peligro por tsunami es casi nulo, por ende la información es muy escasa a pesar de la importancia que tienen estos eventos. Aunque no sean altamente recurrentes, los tsunamis tienen un poder destructivo enorme, que causa pérdidas tanto humanas como económicas e incluso ambientales. El generar información y entender más este fenómeno natural nos permitirá un mejor manejo del peligro en un futuro.

Es primordial entender los efectos de un tsunami para determinar su peligro en las poblaciones costeras, antes de que vuelvan a ocurrir. Un ejemplo de los efectos de un tsunami, es el caso de Chile el 19 de mayo de 1960, donde un terremoto con magnitud de 9.5 Mw ocasionó un tsunami que arrasó con pueblos y ciudades costeras. Generó un mejor conocimiento sobre estos fenómenos, transmitidos generación tras generación (Lagos y Cisternas, 2004). Sin embargo, este conocimiento empírico sobre el fenómeno empieza a ser olvidado en las generaciones futuras, debido a su baja frecuencia.

En consecuencia, al cabo de algunas generaciones, un tsunami puede sorprender a la población nuevamente. Por esto, es importante divulgar el conocimiento sobre los fenómenos que han ocurrido, y su potencial destructivo, capacitando a la población e incentivándolos a tomar medidas de prevención.

Cabe destacar que esta información no sólo debe difundirse entre los pobladores que habitan en zonas costeras, sino también entre las dependencias e instituciones de seguridad pública. Además, la información debe ser divulgada de la manera adecuada, es decir, subrayando que estos fenómenos están presentes y contienen una gran energía, y que se pueden establecer medidas preventivas, sin una orientación alarmista.

Este trabajo propone estudiar mediante percepción remota y SIG el peligro por inundación de tsunami, específicamente en la costa de 2 municipios del estado de

Oaxaca. El trabajo permitirá en primera instancia reconocer la historia sísmica y de tsunamis de este sector de la costa, elaborar un mapa geomorfológico y mediante esto derivar en un mapa de peligro por tsunami en la zona.

La tesis se encuentra dividida en 4 capítulos. En el primero se describe brevemente la zona de estudio y sus principales características, desde un ámbito espacial, social y económico. El segundo capítulo corresponde al marco teórico, donde se describen los conceptos claves para el trabajo, es decir, los tsunamis y la geomorfología costera, y una breve descripción de sus características más importantes. El tercer capítulo está constituido por la metodología utilizada en la elaboración del mapa de peligro. Posteriormente, en el cuarto capítulo se presentan los resultados, mediante tablas, mapas, su descripción y la discusión de los mismos. Al término de los capítulos se encuentra la conclusión en una breve sección.

1.2 HIPÓTESIS

La costa de Oaxaca (Santiago Pinotepa Nacional y Santa María Huazolotitlán) está sujeta a peligro de inundación por tsunamis, debido a su historia sísmica y la de sus tsunamis, así como su ubicación con respecto a la zona de subducción mexicana y a su morfología.

1.3 OBJETIVO

Identificar zonas de peligro de inundación por tsunami en la costa de Oaxaca, con base en la morfología, la distancia y la elevación sobre el nivel del mar.

Objetivos específicos:

1. Elaboración de un mapa geomorfológico.
2. Identificar formas del relieve con potencial de inundación.
3. Creación de un mapa de peligro de inundación por tsunami, con base en la morfología, elevación del terreno sobre el nivel del mar y la distancia a la línea de costa

2. ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio en este trabajo fue determinada utilizando 3 criterios:

- 1) Histórico: El 28 de marzo de 1787 en Oaxaca ocurrió un fuerte sismo, de magnitud estimada M 8.6, conocido como “San Sixto”, provocó un fuerte tsunami, el cual inundó 6 km tierra dentro. Son el sismo y tsunami más poderosos en México de los que se tiene algún registro (Núñez et al., 2008; Suárez y Albin, 2009).
- 2) Sismicidad: En Oaxaca es muy alta, debido a que se encuentra en una zona de subducción de placas tectónicas; representa el 25% de la sismicidad de todo el país, a pesar de que el estado es sólo el 4% del territorio nacional (INEGI, 2011; SSN, 2012).
- 3) Geomorfología: Las formas del relieve, como una planicie aluvial muy extensa, la una laguna, pequeños lomeríos y otras características en la configuración de la línea de costa, la hacen susceptible a inundación por tsunamis.

2.1 Localización

El área de interés se encuentra en la costa de Oaxaca y coincide con los límites de 2 municipios (Figura 4): Santa María Huazolotitlán ($16^{\circ} 03'$ y $16^{\circ} 20'$ N; $97^{\circ} 51'$ y $98^{\circ} 01'$ O) y Santiago Pinotepa Nacional ($16^{\circ} 06'$ y $16^{\circ} 29'$ N; $97^{\circ} 57'$ y $98^{\circ} 20'$ O). Representan el 1.11 % de la superficie del estado. Ambos municipios forman parte de la Sierra Madre del sur y su altitud varía entre los 0 a los 800 m sobre el nivel del mar (INEGI, 2011).

La zona elegida para trabajar fue delimitada en función de los datos históricos y las características de extensión del tsunami de 1787, mismo que penetró 6 km tierra dentro.

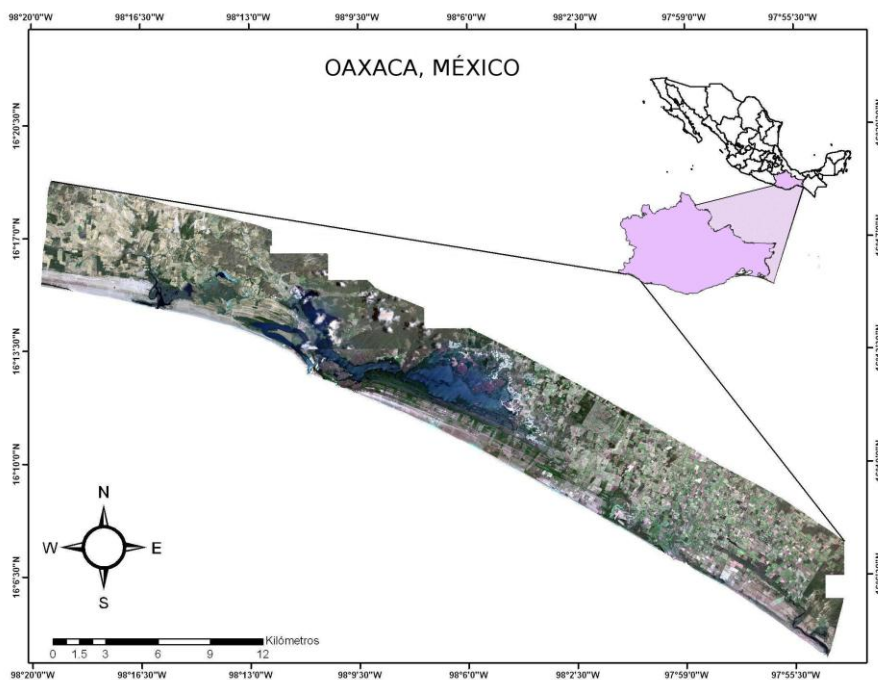


Figura 4. Mapa del área de estudio

La zona de estudio incluye la Laguna de Corralero, así como varios esteros y depresiones de pequeños tamaños.

2.2 Tectónica

El estado de Oaxaca se encuentra ubicado en la zona de subducción de la placa de Cocos bajo la placa Norteamericana, la cual se extiende a lo largo de más de 1500 km frente a la costa sur del océano Pacífico mexicano. La convergencia de estas placas es de 2 a 5 cm/ año. La zona de estudio se encuentra constituida en su mayoría por rocas metamórficas e ígneas intrusivas y el tipo de suelo dominante es el regosol y gleysol (INEGI, 2011)

2.3 Vegetación y uso del suelo

La vegetación que caracteriza a la planicie costera de Oaxaca es selva media caducifolia que se desarrolla en elevaciones de hasta 200 m. El área de estudio también presenta mangle, el cual se desarrolla en la orilla de cuerpos lagunares costeros, en aguas poco profundas o incluso tierra dentro en suelos con textura fina (García-Mendoza et al., 2004). La vegetación de mangle del área de estudio se constituye de mangle rojo (*Rhizophora mangle*) y mangle blanco (*Avicennia nítida*) principalmente (INEGI, 2011). También se pueden encontrar palmar, pastizales cultivados, salinas, algunas zonas de agricultura (García-Mendoza et al., 2004; INEGI, 2011).

2.4 Clima

El área de estudio presenta un clima cálido subhúmedo, con lluvias en verano, además de fuerte estacionalidad y presencia de altas temperaturas (García-Mendoza et al., 2004). Las temperaturas varían entre los 26° a los 31° a lo largo del año. La precipitación es de 1356.4 mm según marca la estación de Pinotepa Nacional en ERIC III.

2.5 Composición social y económica.

La población que se encuentra en la zona de estudio está constituida principalmente por etnias afroamericanas y es una de las pocas poblaciones que hasta la fecha la preserva. Los pobladores de la zona tienen como actividad principal la ganadería y la pesca (Figura 5 y 6), en menor grado el turismo, y se complementan con la agricultura, consistente en plantaciones de palma.



Figura 5. Ganadería de la región



Figura 6. Lancha de pescadores de Corralero, Oaxaca.

La densidad de población en esta zona no es muy alta y en general presenta un alto índice de pobreza (CONEVAL, 2010), por lo que este trabajo podría ayudar a un estudio futuro de vulnerabilidad y la construcción de un plan de prevención.

2.6 Historia- El gran tsunami en Oaxaca de 1787

Existen documentos históricos, como el que presenta la Gaceta Mexicana, volumen 34, primer periódico nacional, donde se describe lo siguiente para el año de 1787:

- Ometepec Gro.: *“Don Francisco Gutiérrez de Terán, Alcalde mayor de Igualapan, participa con esta fecha los temblores acaecidos en su Jurisdicción desde el día 28 de Marzo a las once de la mañana, (en que se verificó el primero con duración de siete minutos y una violencia jamás allí experimentada) hasta el día 3 del próximo pasado Abril, en cuyo periodo de tiempo numera hasta treinta y cinco, unos con previo aviso del mar y otros sin el “...” Dice que al tiempo del primero, estando varios infelices de aquellas pesquerías haciendo barras para coger pescado, y ya algunos montados á caballo después de haberlo recogido y metido en sus redes, vieron con asombro retirarse el mar más de una legua, descubriéndose tierras de diversos colores, peñascos y árboles, y que con la misma velocidad que se huyó de su vista volvió otra vez y otras, dejando millares de pescados en el distrito que quedo sin agua y dejando pescadores colgados y metidos entre los palos de un monte, que dista como legua y media del mar, y de excesiva altura, escapando solamente algunos, aunque muy maltratados y heridos, que son los que han referido el caso, todos vecinos de aquella Jurisdicción”.*

*La legua referida en el terremoto de 1787 es la “legua Mexicana”, equivalente a 4.19 km (Núñez et al., 2008)

- Tehuantepec, Oaxaca: *“El Teniente Coronel Tomás de Mollinedo, Alcalde mayor de esta Jurisdicción, participa con esta fecha, haberse sentido en ella el terremoto del 28 de Marzo y otros varios muy lentos, casi a la misma hora que en los demás lugares y con la duración de siete minutos; pero que el día 3 de Abril como a las diez de la mañana repitió otro como por 10 minutos con tanta violencia”...* Igualmente los lugares cercanos al mar distantes cuatro leguas de la villa se han sentido los movimientos con una extrañísima conmoción de las aguas, y espantoso bramido de aquel, resultando arrojar a la playa peces de extraordinario grandor y conchas nunca vistas, cuya magnitud se ha hecho admirar de todos.”



Figura 7. Imagen satelital donde se muestran las ciudades donde hay reportes de que fueron afectadas por el tsunami originado por el sismo de "San Sixto", en rojo los municipios donde se encuentra el área de estudio (Google Earth, 2011).

La zona de estudio se encuentra en una sección de la costa que fue la más afectada por este evento. Por su parte, Núñez *et. al.* (2008) citan un informe adicional de la Gaceta Mexicana que coincide con la zona de estudio, y una descripción ya hecha en Ometepec, rescatando esta parte y afirmando decir lo siguiente para Corralero, Pinotepa, Oaxaca (Figura):

“...Se dejó once heridos y los pescadores cuelgan de los árboles en una colina, la cual se encuentra a 1.5 leguas de la costa, sólo algunos pescadores sobrevivieron, pero resultaron muy heridos, ellos son quienes describen el evento, habitantes de esta zona.”

Núñez et al. 2008 calculan una magnitud de aproximadamente 8.4 para el sismo de San Sixto y presentan un modelo de altura del tsunami a lo largo de la costa con base en los documentos históricos del tsunami de 1787 (Figura 8).

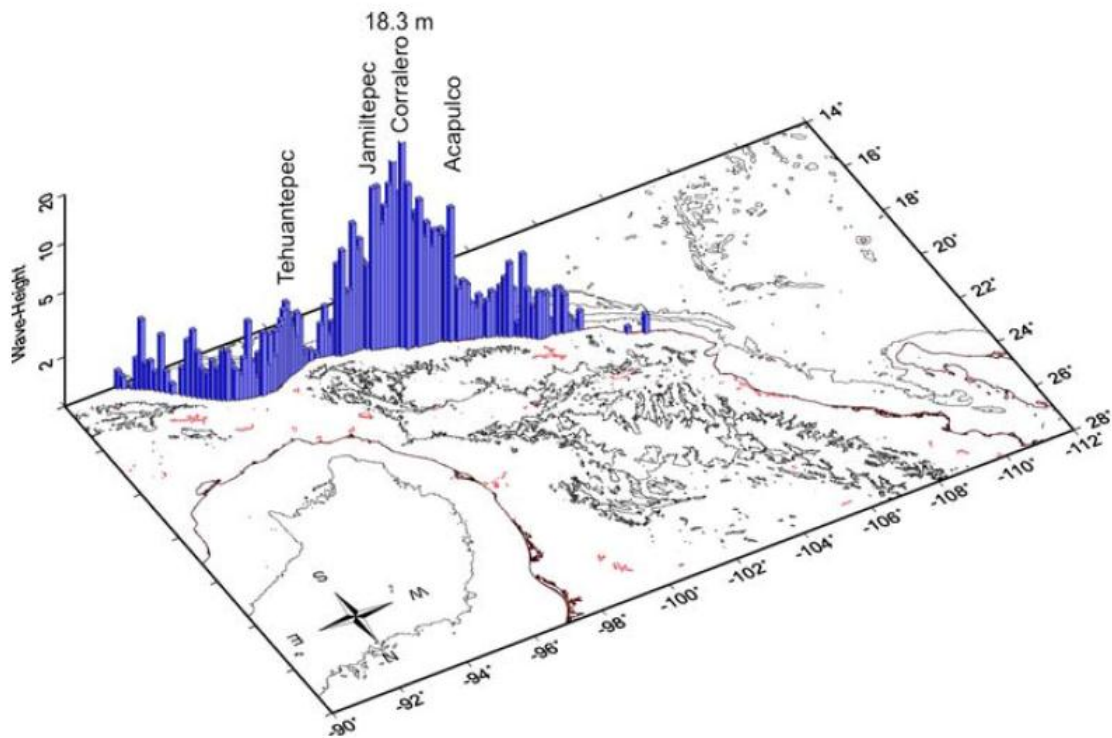


Figura 8. Mapa de México donde se representa la modelación de Núñez et. al 2008 para las alturas del tsunami provocado por el sismo de "San Sixto" (Núñez et al., 2008).

El modelo muestra las alturas máximas de olas del tsunami coincidentes con las localidades de la zona de estudio, donde resalta Corralero, Pinotepa con una altura de ola de 18.3 m.(Núñez et al., 2008)

3. MARCO TEORICO

3.1 Tsunamis

En la dinámica de los procesos naturales y la actividad humana, los tsunamis se consideran entre los más destructivos y complejos fenómenos físicos. A pesar de su baja frecuencia, son considerados extremos, puesto que son de una rápida generación y gran energía, lo que los hace responsables de la pérdida de un gran número de vidas humanas, además de una extensa destrucción en localidades costeras (Lagos, 2000).

3.1.1 Antecedentes

Algunos ejemplos de grandes tsunamis son los ocurridos en Chile en 1960 y en Indonesia en 2004, y el más reciente ocurrido en Japón el 11 de marzo 11 de 2011. Todos ellos generados por un fuerte sismo en una zona de subducción; la destrucción cobró la vida de miles de personas, generando daños tanto inmediatos como a mediano y largo plazo. Desde 1960 han ocurrido tsunamis que han generado gran devastación (Tabla 1).

Tabla 1. Magnitud y Run-up de los más grandes tsunamis registrados (NOOA, 2011)

Grandes tsunamis			
Lugar	Fecha	Mw	Alturas Máximas (ms)
Chile	1960	9.5	25
Alaska	1964	9.2	70
Sumatra	2004	9	35
Chile	2010	8.8	29
Japón	2011	9	41

El 26 de Diciembre de 2004 en Indonesia, por la mañana, se registró un terremoto de una magnitud $M=9.3$ que ocurrió a lo largo de 1300 km de la zona de subducción del noreste de la isla de Sumatra hacia las Islas Andamán en el oriente del Océano Indico (Rabinovich y Thomson, 2007) (Figura 9). El terremoto generó grandes ondas destructivas de tsunami que dañaron las regiones costeras del Océano Indico y causaron la muerte de más de 226.000 personas, según reportes (IFRC, 2005). Este terremoto y tsunami han sido de los pocos que pudieron ser bien documentados a una escala global; sus ondas fueron generadas en un océano y propagadas hacia otros (Rabinovich y Thomson, 2007) (Figura 1).

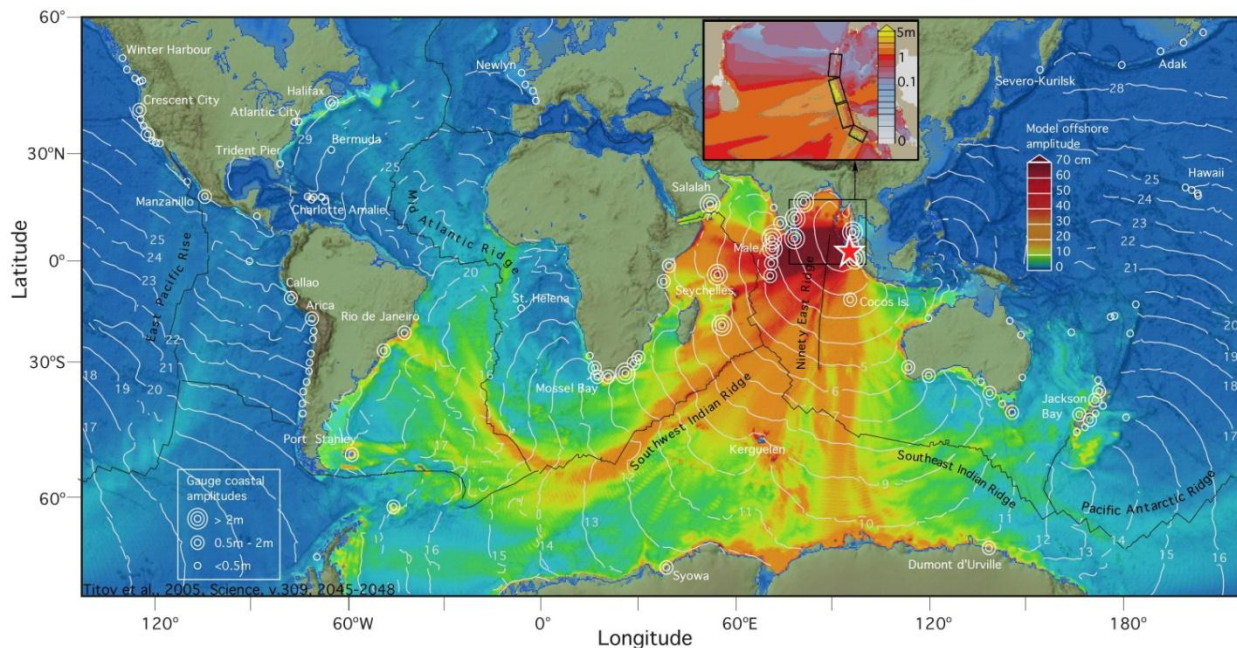


Figura 9. Propagación de las ondas de tsunamis generadas por el terremoto en Indonesia 2004 (NOOA, 2011).

Uno de los tsunamis más conocido entre los medios recientemente, ocurrió el 11 de marzo en Japón, un país que continuamente sufre por estos fenómenos y experimentó un terremoto con M_w 9 y un posterior tsunami que impactó severamente (Bergeron, 2011). Japón tiene una de las regiones costeras más pobladas en el mundo y su historia sísmica revela que los tsunamis ya han destruido a poblaciones enteras.

Estos casos han contribuido a la ciencia y su investigación. A partir del suceso de 2004 el interés por el estudio y modelado de tsunamis se ha extendido rápidamente (Cumminis et al., 2008).

3.1.2 Origen

Tsunami es una palabra japonesa (津波), que en su traducción original significa “Ola en el puerto” (Levin, 2009). En la actualidad un tsunami es definido principalmente como un fenómeno que tiene origen en el océano, el cual consiste en una serie de ondas largas gravitacionales (con una longitud de onda mayor a su altura) formadas por una alteración de corta duración pero que abarcan gran extensión.

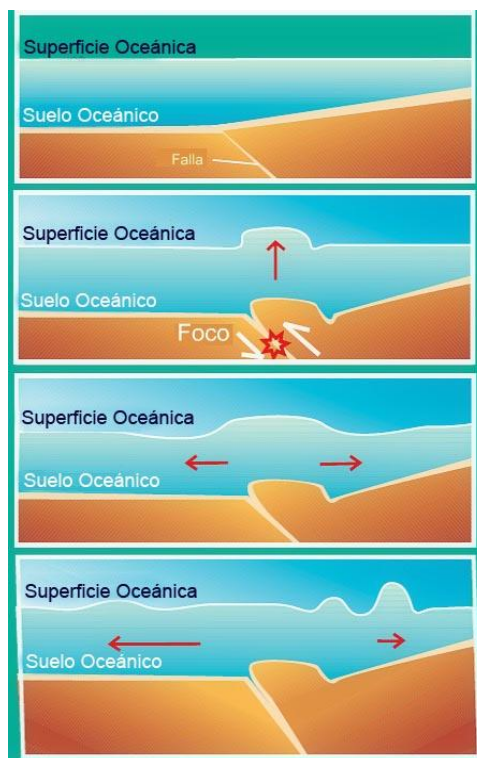


Figura 10. Formación de un tsunami debido a un movimiento tectónico (UNESCO, 2011).

Las ondas de un tsunami se forman principalmente por un disturbio sísmico, que impulsa y desplaza verticalmente la columna de agua por la superficie, originando la

secuencia de ondas largas, con un período que va de varios minutos hasta un par de horas, y se propaga a gran velocidad en todas direcciones desde la zona de origen (Figura 10).

Las ondas de tsunami al acercarse a la costa alcanzan grandes alturas descargando toda su energía sobre ésta y penetrando algunos kilómetros tierra adentro a través de sectores bajos, provocando una vasta destrucción e inundación (Satake y Atwater, 2007)

Existen otras causas que pueden producir un tsunami, como lo son las erupciones volcánicas o deslizamientos submarinos e incluso por impacto de meteoritos, sin embargo la gran mayoría de los tsunamis destructivos son producidos por terremotos submarinos

3.1.3 Tipos de tsunamis según su distancia a la fuente de origen.

Dependiendo de la escala de la zona afectada por la fuerza destructiva de los tsunamis y de la distancia a su fuente de origen, se pueden distinguir tres diferentes tipos: local, regional y eventos remotos, estos últimos se conocen también como transoceánicos o teletsunamis (Levin y Nosov, 2009).

Los tsunamis locales son aquellos donde el efecto destructivo se concentra en distancias no superiores a 100 km de la fuente. En cambio, si la zona afectada por el tsunami se produce a distancias de hasta 1000 km de su fuente, estamos hablando de un evento regional. Estos dos tipos son los que más catástrofes producen. Sin embargo, aunque sean poco recurrentes, el tercer tipo es mucho más peligroso, los denominados teletsunamis, los cuales afectan más de 1000 km desde su punto de origen. Después de haber causado gran destrucción en las zonas inmediatas a la fuente, estas ondas son capaces de viajar miles de kilómetros y continuar llevando una gran amenaza a otras zonas (Levin y Nosov, 2009).

3.1.4 Características de un tsunami.

Los sismos son la causa más común de grandes tsunamis, con ondas que pueden viajar a través de todo el océano, con una pérdida muy baja de energía, lo cual hace posible la generación de tsunamis transoceánicos (Figura 11) (UNESCO, 2008).

Las ondas se distinguen de las olas comunes por la gran extensión entre sus crestas, ya que usualmente es superior a 100 km en el océano profundo, así como por el tiempo en el que dichas crestas transcurren, de unos 10 minutos hasta un par de horas (Estrada y Farbiarz, 2005).

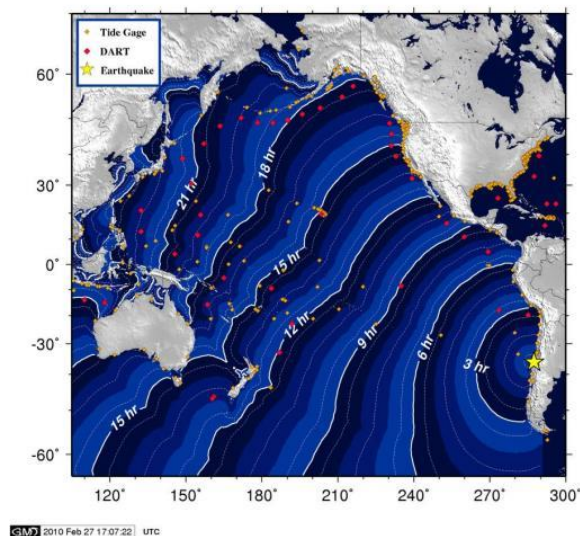


Figura 11. Propagación de ondas por tsunami (<http://wattsupwiththat.com/2010/02/27/tsunami-threat-for-hawaii/>)

Los tsunamis son únicos en el sentido que la forma de onda se extiende a través de toda la columna de agua, desde el fondo oceánico hasta la superficie del mar. Esta característica hace posible que el tsunami propague una gran cantidad de energía.

Las características de las ondas que viajan dependerán del movimiento vertical y horizontal del piso oceánico del área donde ocurrió el sismo, así como de la eficiencia

con la que la energía se transfiere desde la corteza terrestre hasta el agua oceánica, la trayectoria de las ondas y finalmente de las características de la costa a la que llega el tsunami (Caicedo et al., 1997; NOAA, 2002)

La llegada del tsunami (Figura 12) permite definir las características del evento y hacer comparaciones en diferentes sitios afectados por un mismo tsunami, e incluso comparar eventos separados en el tiempo y el espacio.

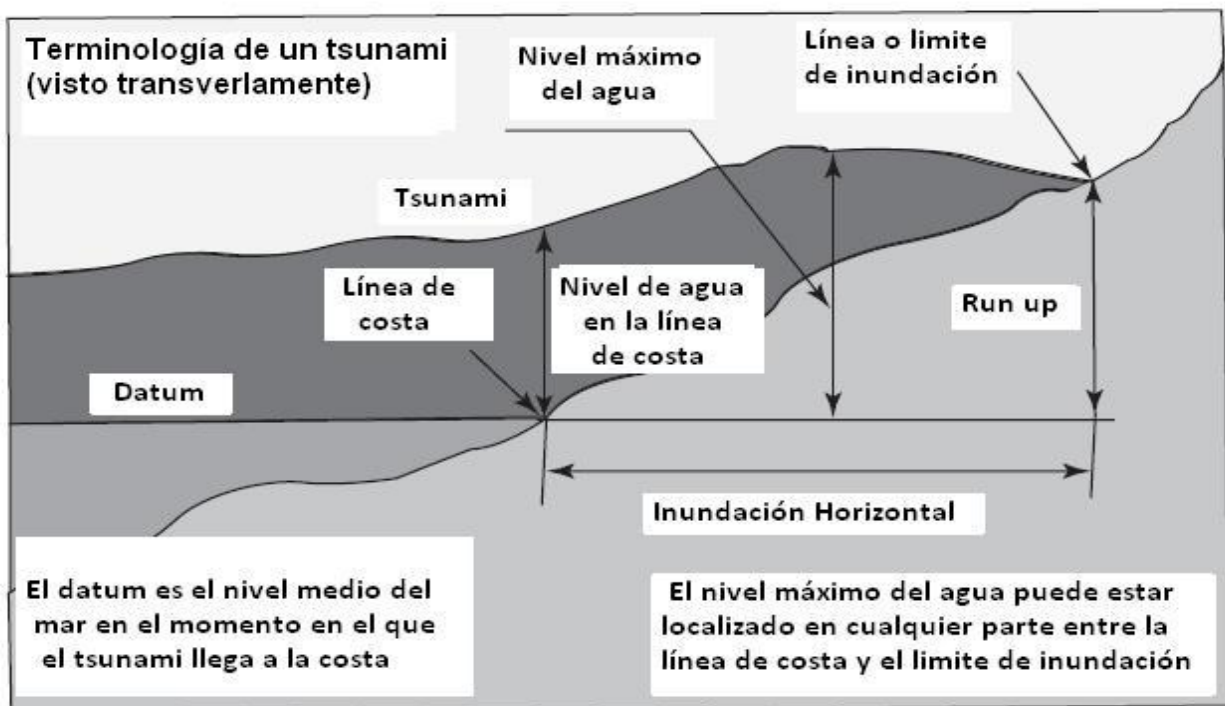


Figura 12. Terminología de las características de un tsunami al llegar a la zona costera (Levin y Nosov, 2009).

3.1.5 Impacto por tsunami

La fuerza con la que impacta un tsunami las áreas costeras está determinada por varios factores:

- a) Magnitud y profundidad del sismo que lo genera.
- b) La topografía submarina en donde se propaga.
- c) La distancia de la costa al epicentro del sismo.
- d) Configuración de la costa.
- e) La orientación con la que llega el tsunami a la costa.
- f) Presencia de corales, rompeolas y estado de la marea en la llegada del tsunami.
- g) Influencia antrópica, vegetación y otros obstáculos en la costa.

TSUNAMI



Figura 13. Llegada de un tsunami a la costa (USGS, 2011).

La topografía de las tierras emergidas influye directamente en la penetración del tsunami en superficie. Cuando la pendiente es relativamente fuerte la extensión de la zona inundada no es significativa, a excepción de valles angostos, en cambio, cuando el terreno es plano o con escasa pendiente, la penetración puede abarcar kilómetros tierra adentro (Figura 13) (UC, 2011).

3.1.6 Propagación de un tsunami

A partir de su área de generación los tsunamis se propagan en todas direcciones. Sin embargo, la mayor energía se produce en una dirección perpendicular al choque entre placas que generó el sismo. La velocidad con la que se propagan las olas depende de la profundidad del agua, produciendo aceleraciones y desaceleraciones, conforme avanzan sobre un fondo oceánico con diferente profundidad (Figura 14) (UNESCO, 2008)

En aguas profundas las ondas por tsunami viajan a velocidad de 500 a 1,000 km/h, pueden tener una longitud entre crestas tan grande como de 500 a 650 km (Sánchez, 1993; UNESCO, 2008). En mar abierto la altura de las ondas es generalmente de un metro, inclusive para los tsunamis más destructivos esto hace que una onda en el océano sea prácticamente imperceptible para un observador a bordo de un barco (Levin y Nosov, 2009).

Al llegar las ondas del tsunami a aguas superficiales, la velocidad de propagación disminuye como consecuencia de una profundidad menor, provocando que las ondas se comiencen a frenar y generen una compresión entre ellas, dando como resultado una mayor amplitud que se refleja en un levantamiento del agua por incluso decenas de metros (Levin y Nosov, 2009), altura que varía dependiendo de algunos factores: las características de sus olas en mar abierto, la difracción, segregación y el esparcimiento, la pendiente y la configuración de la costa, la captura por islas, la resonancia local en bahías, golfos, entre otros aspectos de la geomorfología del sitio (FEMA, 2004; NOAA, 2002; Sánchez, 1993). Se ha visto que en costas o islas protegidas por arrecife de corales la energía que reciben es regulada por estos, lo que permite una protección a la trayectoria directa del tsunami (NOAA, 2000).

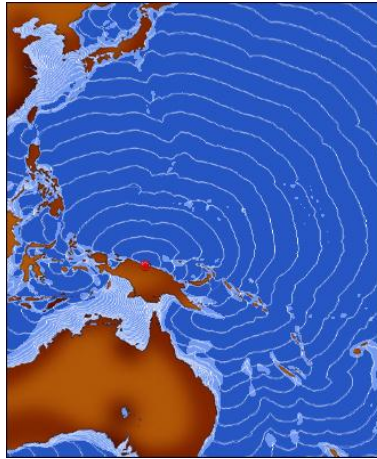


Figura 14. Carta de propagación de la onda del tsunami de Papua Nueva Guinea, ocurrido en julio de 1998. Las isocronas muestran a intervalos de 30 minutos el tiempo de avance del frente de onda (NOOA, 2011).

En algunas ocasiones el tsunami inicialmente provoca un retroceso de las aguas costeras, dejando expuesto gran parte del piso oceánico. Esta exposición puede representar una señal de alerta para los habitantes de la región, aunque no siempre se presenta este retroceso.

3.1.7 Resonancia generada por tsunamis

La dispersión de las ondas del tsunami en la costa dependerá de su geomorfología, lo cual permite la generación de fenómenos como la resonancia (Levin y Nosov, 2009). Es el fenómeno de reflexión en los bordes de una costa que genera una fuerza de compresión entre los remanentes de las ondas, aumentando la energía de las ondas en sobre una geoforma. La reflexión e interferencia continua que sufren las olas de un tsunami, desde el extremo de un puerto o una estrecha bahía, pueden aumentar las alturas y extender la duración de la actividad de las olas producidas por un tsunami (Cumminis et al., 2008; NOAA, 2000; UNESCO, 2008).

3.1.8 Estudio de los tsunamis.

Todos los océanos del mundo son capaces de generar tsunamis, pero en el océano Pacífico y en sus mares marginales este fenómeno es muy frecuente debido a la mayor ocurrencia de fuertes sismos a lo largo de sus márgenes.

Para generar un tsunami, el foco del evento debe ser superficial (menor a 70 km) y la falla que lo produce debe desplazar verticalmente el suelo oceánico sobre un área extensa. la mayoría de tsunamis destructores se generan en zonas de subducción (Satake y Atwater, 2007; Sauter, 1989)

Actualmente, modelos geofísicos y estudios geológicos confirman que los tsunamis presentan algún grado de ciclicidad, en cuanto a su periodicidad y magnitud (Lagos y Cisternas, 2004). Lamentablemente, debido a la escala geológica de su ocurrencia, existen muy pocos registros de manera escrita que permitan conocer el comportamiento de estos eventos en áreas costeras específicas. En este contexto, surge la importancia de estudiar tsunamis pasados como indicadores de lo que puede ocurrir en el futuro, así también, información para el estudio del riesgo, peligro y vulnerabilidad costera, el ordenamiento de territorios costeros, el diseño de medidas de mitigación y el manejo de la emergencia (Lagos y Gutiérrez, 2005). Conocer la ciclicidad y los límites de inundación por los grandes tsunamis pasados que han afectado las costas, se transforma en un requisito fundamental para cualquier estudio de riesgo y para la generación de modelos, planificación de la zona costera (Lagos and Cisternas, 2004).

3.2 Geomorfología general y Costera

La Geomorfología es la ciencia que estudia estas características físicas de la superficie terrestre. Dichas características físicas son llamadas formas del terreno o geoformas, y moldean el paisaje (Huggett, 2007). Pueden ser clasificadas de dos maneras, una es mediante su descripción (montañas, valles, planicie y otras más) y la otra mediante los procesos genéticos de su formación o procesos geomorfológicos (Huggett, 2007; Spellman, 2010)

Las geoformas pueden ser interpretadas en base a su tamaño, forma, orientación, composición y la distribución de características topográficas. Las cuales pueden ser analizadas en mapas topográficos y fotografías aéreas, también mediante observaciones directas en el terreno (Easterbrook y Kovanen, 1999).

3.2.2 La Zona Costera

En la zona costera interactúan los tres sistemas naturales mayores de la Tierra: la atmósfera, el océano y la tierra firme, por lo que es de vital importancia para la transferencia de material de la superficie terrestre hacia el sistema oceánico y viceversa, especialmente mediante la erosión y transportación (Davidson-Arnott, 2010). Debido a la alta tasa de intercambio de material, la zona costera es muy dinámica y variable. Su amplitud tierra dentro puede ir desde unos pocos cientos de metros en zonas de acantilados, hasta varios kilómetros en zonas de extensas dunas u otras geoformas. Sin embargo, hacia el mar, el borde de la plataforma continental es considerado el límite (Davidson-Arnott, 2010).

Alrededor del mundo se puede observar que las zonas costeras varían incluso entre distancias bastantes cortas, principalmente por dos razones. La primera tiene que ver con los factores físicos, como el desarrollo geológico, la geología del lugar, los procesos superficiales y los cambios del nivel del mar y de la tierra. Por el otro lado, hablamos del

aspecto social, ya que cada país presenta una única perspectiva de su línea de costa, la historia de su forma y su cultura, así como su percepción de la naturaleza física y biológica de la costa misma (Davidson-Arnott, 2010). Dado esto podemos derivar que las zonas costeras son diversas tanto por su conformación natural y geomorfología, como la forma en que fue ocupada y modificadas por la población.

Por otro lado, las zonas costeras son altamente afectadas por desastres naturales. Tal situación es un fuerte incentivo, tanto social como económico, para el entendimiento de los procesos que ocurren estas zonas, con la finalidad de reducir el impacto de fenómenos como un tsunami (Davidson-Arnott, 2010).

3.2.3 Procesos de formación de la zona costera.

Los principales procesos responsables de la formación de las geoformas costero son erosión, transportación y el depósito de materiales erosionados. En respuesta a esta interacción se forman diferentes tipos de costas, que dependen de la fuerza de los agentes y de la roca que esté presente (Ritter et al., 2002; Spellman, 2010)

Otro factor muy importante que interviene en los procesos de formación son las olas, causantes del mayor factor de erosión de las zonas costeras. Las olas son ondulaciones formadas por el viento que corre sobre la superficie terrestre, generando variaciones de presión en el agua, la energía del viento es transferida hacia el agua en el área de generación de ondas. La cantidad de transferencia de energía depende de la velocidad del viento.

Al romper las olas su movimiento puede ser constructivo o destructivo dependiendo del movimiento neto del material de la playa, el cual puede ser hacia la costa o hacia el mar. Los golpes en la costa generados por las olas son un proceso con gran poder erosivo. El efecto que tienen en las rocas dependerá de la resistencia de las rocas atacadas y de la energía de la ola (Huggett, 2007).

A pesar de que el oleaje es la variable dominante en el proceso de formación de ambientes marinos, los cambios relativos del nivel del mar y de la tierra son una fuerte variante a gran escala de tiempo, puesto que pueden influir mucho en estos procesos y la forma en que se construye la costa (Davidson-Arnott, 2010).

Por último, la actividad biológica también contribuye a la formación de ambientes marinos. Organismos como Los corales y otros organismos carbonados hacen arrecifes de coral, los cuales pueden ser realmente muy amplios. Otros ejemplos son las algas calcáreas que producen incrustaciones de carbono a lo largo de muchas costas tropicales. Las plantas tolerantes a la sal colonizan las marismas, como lo son los manglares, que son un gran componente de la vegetación de las costas tropicales y ayudan a atrapar sedimentos en sus sistemas de raíces (Huggett, 2007).

3.2.4 Geoformas costeras

El tipo de geoformas que presentan los ambientes costeros dependen de los procesos de formación que se lleven a cabo en el lugar. Esto es importante, ya que a partir del tipo de geoforma presente, el tsunami actuara de una manera u otra. Esto se puede explicar en el caso del tsunami de Indonesia en el 2004, donde las imágenes por satélite muestran dunas de arenas intactas, así como plataformas formadas de rocas, marismas de manglar, formaciones de arrecifes e islas que funcionaron como barreras contra el impacto de las olas, inundación y erosión (Hart y Knight, 2009). Todas estas barreras reducen la energía de las olas que llegan, su run-up y área de inundación. Al contrario áreas, sin protección presentaron gran devastación (Hart y Knight, 2009). Existen trabajos como el de Deirdre Hart en el 2009 donde realiza un análisis en GIS para medir el peligro de inundación y por tsunami en la costa de Christchurch, Nueva Zelanda. En el trabajo Hart evalúa la vulnerabilidad de una costa con sistemas de dunas amenazada por tsunami, generando cuatro escenarios diferentes de inundación. En este trabajo se consideraron las geoformas que se encuentran en un ambiente costero como el de Oaxaca, México. Es decir, en un ambiente tropical, dichas geoformas se explican en el anexo 2.

4. METODOLOGÍA

4.1 Percepción Remota

A lo largo de la historia, científicos han formulado hipótesis para llevar a cabo una investigación, las cuales han sido aprobadas o rechazadas mediante métodos sistemáticos. La colecta *in situ* se aplicó en gran parte de las investigaciones del siglo pasado, sin embargo, en la actualidad con la tecnología espacial se puede coleccionar información a gran distancia del objeto de estudio. Estas técnicas y métodos se conocen como sensores remotos del ambiente, la Sociedad Americana de Fotogrametría (ASPRS por sus siglas en inglés) la definió en 1988 de la siguiente manera:

“Arte, ciencia y tecnología para obtener información confiable acerca de objetos físicos y del ambiente, a través de procesos de grabación, medidas e interpretación de imágenes y representaciones digitales de patrones de energía derivados de sistemas de sensores sin contacto.”

La percepción remota puede ser entendida como una técnica para derivar información acerca de la superficie terrestre y acuática, e incluso atmosférica mediante la interacción de la radiación electromagnética (ya sea en una o más regiones del espectro electromagnético) que es reflejada o emitida por la superficie terrestre y los objetos que se encuentran en ella. Estas radiaciones son medidas y capturadas en imágenes, por medio de los sensores instalados en plataformas aéreas y espaciales (Campbell, 2002; Sabins, 1997). Los datos de información remota pueden ser obtenidos de muchas formas diferentes, incluida la fotografía aérea, imágenes digitales de satélites y radar (Aronoff, 2005). Estos productos en conjunto con los sistemas de

información geográfica, los sistemas de posicionamiento global y la cartografía digital, es lo que se conoce como tecnología de la información geográfica (Sabins, 1997)

La obtención de imágenes de percepción remota, como es el caso de las imágenes satelitales utilizadas, consiste en varios procesos interrelacionados. En rasgos generales, primero debemos identificar nuestro objeto físico, ya sea, vegetación, suelo, agua, etc. y después el objeto será visto y analizado según la disciplina de interés (Aronoff, 2005; Campbell, 2002).

La colección de imágenes digitales es almacenada en bases de datos, ya sean libres o privadas, y son usadas para producir mapas, tanto básicos como temáticos. La aplicación de la percepción remota puede ser parte de un análisis combinado con otros datos específicos de un problema práctico, como lo es el uso de suelo, exploración mineral, mapeo de la calidad del agua o como es el caso de este trabajo, para la determinación de peligro por tsunami en un área de Oaxaca, México (Campbell, 2002). En esta tesis la percepción remota es utilizada como una técnica que se vincula a los sistemas de información geográfica.

4.1.1 Obtención de Imágenes del área de estudio mediante Google Earth

Google Earth (GE) es un programa desarrollado por la compañía Google, el cual funciona como visualizador de imágenes de percepción remota. Una de las virtudes de dicho programa es que permite el acceso a imágenes de alta resolución, como por ejemplo las imágenes del satélite GeoEye 1. Así como a imágenes relativamente actuales¹. La visualización y consulta de imágenes se realiza con base en un sistema de coordenadas (LatLon, WGS84), lo que permite poder interactuar con los sistemas de información geográfica.

¹ La actualización de las imágenes se hace a discreción de Google, teniendo en algunos sectores de la superficie terrestre imágenes de algunos meses de antigüedad, y en otras tan antiguas como una década.

En este estudio, se utilizó el programa Google Earth Plus (GEP) para la obtención de imágenes de alta resolución, la ventaja del GEP es que permite la extracción de imágenes con mucho mayor detalle, que el programa GE (la licencia de GEP se obtuvo mediante el Programa de licencias educativas gratuitas de Google Grants, www.google.com). Este recurso facilitó el análisis de la zona de estudio, donde no hay fotografías aéreas disponibles. Además, se realizó una visita a campo para el reconocimiento de la zona de estudio y verificar la interpretación. Se obtuvieron 50 imágenes satelitales en Google Earth para cubrir el área de estudio, las imágenes fueron adquiridas usando el parámetro “altura del ojo” de GE a una altura de 5000 m, con sobreposición entre ellas para posteriormente unir las. En el proceso de captura de las imágenes, fueron orientadas hacia el norte y puestas en vista vertical (ortogonal), además de esto, se desactivó el relieve, con la finalidad de que hubiera la menor distorsión posible. La fecha de las imágenes más actuales disponibles en GEP y que se utilizaron para este estudio es noviembre de 2009.

Las imágenes fueron exportadas a un procesador digital de imágenes (Gimp 2.6.11), en el cual se unieron cuidadosamente cada una de las imágenes, dando como producto un mosaico de imágenes que cubre el área de estudio. Por último, las imágenes se fusionaron en un sólo archivo y se corrigieron los canales de colores para mejorar la calidad de la imagen y así realizar una mejor interpretación. Posteriormente, la imagen de la zona de estudio se exportó a un sistema de información geográfica para llevar a cabo georeferenciación y posterior análisis.

4.2 Sistemas de información geográfica (SIG)

Un sistema de información geográfica se define como un sistema informático que facilita las fases para la entrada, almacenamiento, análisis y representación de datos geográficamente referenciados. Dichos datos pueden ser analizados de diferente manera y producir diversas representaciones, como lo es un mapa. Los datos representan una parte de la realidad, tal como es, como lo fue o incluso como creemos

que será. Para esto, un sistema computarizado puede ayudar a generar y almacenar estas representaciones (De-By, 2001)

El mejor y más conocido modelo convencional para el conocimiento del mundo real es el mapa. Ha demostrado ser muy útil para muchas aplicaciones en diversos ámbitos, por ejemplo, para el caso de los tsunamis la UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) publicó un mapa de los tsunamis que se han registrado en todo el mundo desde el año 1650 a.C hasta 2008 (NOOA-UNESCO et al., 2012).

Los datos de sensores remotos en forma digital pueden ser importados directamente a un SIG, en un formato compatible. La percepción remota y el SIG son tecnologías complementarias (Aronoff, 2005).

4.2.1 Delimitación del área de estudio

El área de estudio, ubicada en Oaxaca, México, se distribuye a lo largo de los municipios de Santiago Pinotepa Nacional y Santa María Huazolotitlán y su extensión abarca 6 km de distancia de la costa. Para conformar la base de datos y delimitar el área de estudio, se utilizó el SIG ArcView.

El mosaico de imágenes obtenidas con GEP del área de estudio se importó al programa y fue georeferenciado utilizando las coordenadas disponibles en GEP, dicha georeferencia fue realizada con aproximadamente 15 puntos de control.

Para analizar el área de estudio se delimitaron 3 capas: La primera es el mosaico de imágenes del área de estudio, ya georeferenciada. La segunda es una cobertura de polígonos que constituyen la delimitación municipal de Santiago Pinotepa Nacional y Santa María Huazolotitlán; esta capa corresponde al Marco Geoestadístico Municipal elaborado por INEGI (www.inegi.gob.mx). Posteriormente se sobrepuso una capa de

puntos con las localidades, la cual proporciona información sobre la población, también corresponde al marco geostadístico 2010 de INEGI.

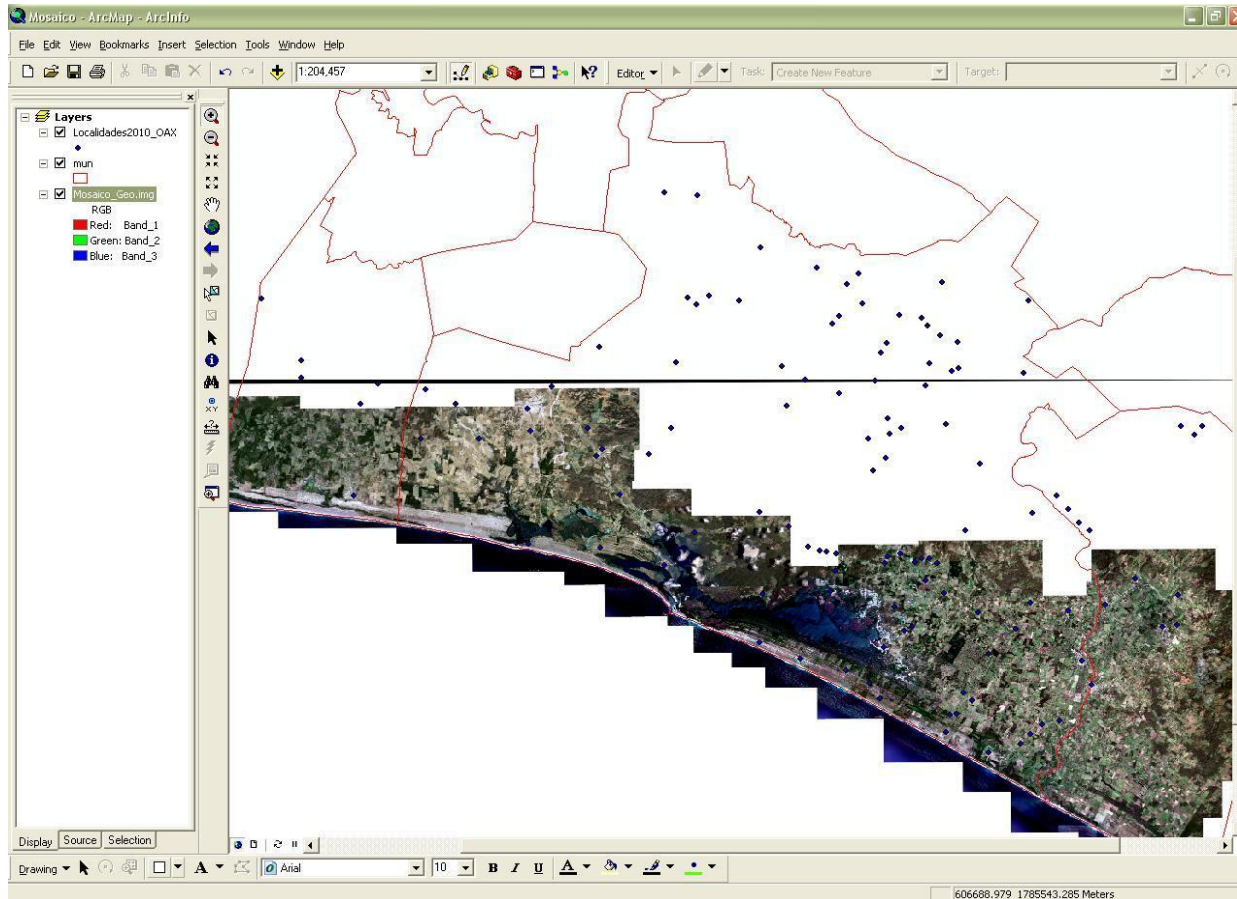
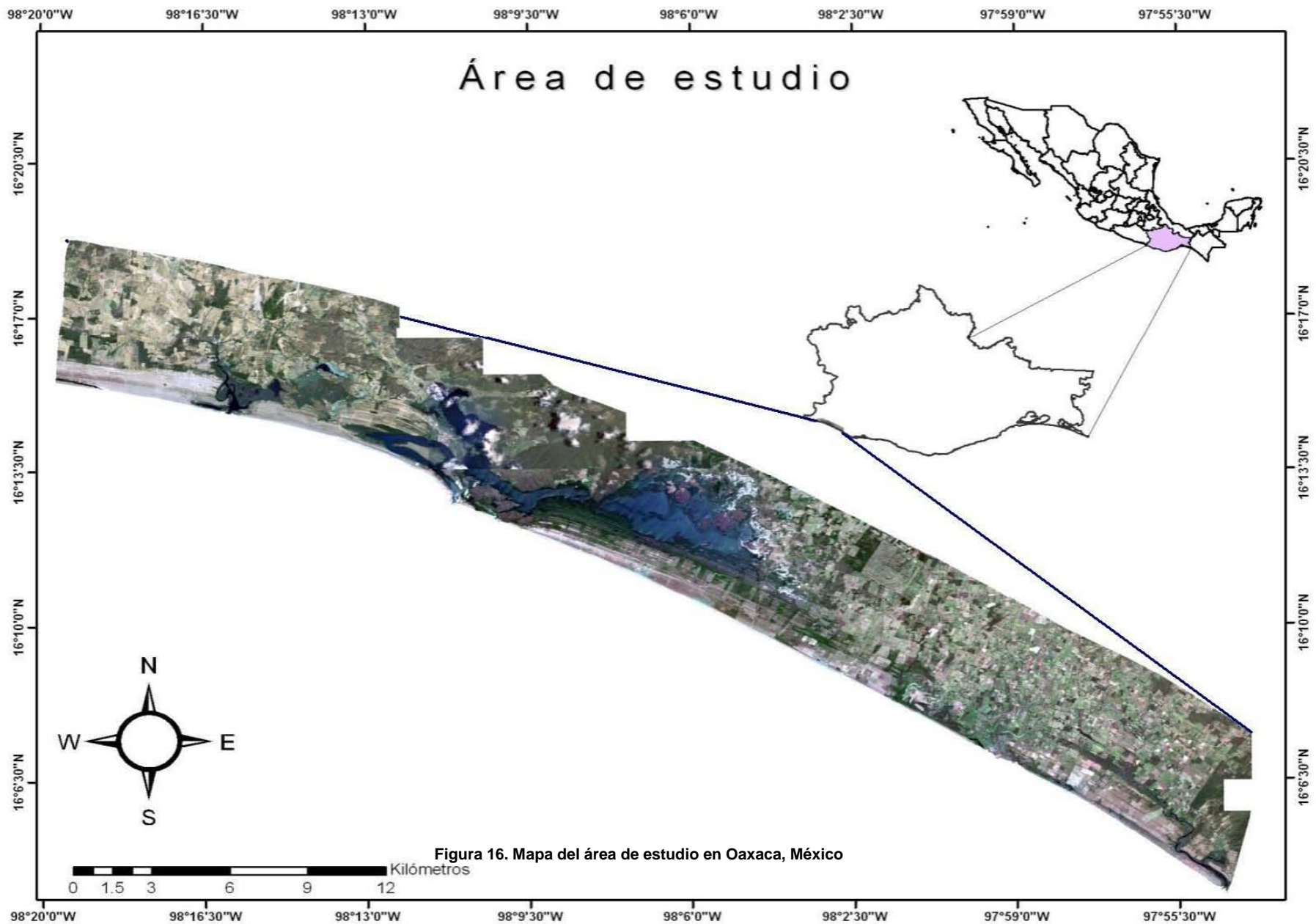


Figura 15. Delimitación del área de estudio, se muestra en ArcView, software utilizado

Las tres capas se unieron y delimitaron (Figura 15). A lo ancho, se tomó como referencia el límite de los municipios. Hacia la costa se delimitó hasta la línea de costa. Por último, para delimitar la costa tierra adentro, se trazó una línea a los 6 km de la costa, debido a que datos históricos describen que esta es la distancia a la que penetró el tsunami de 1787



4.2.2 Elaboración de un mapa geomorfológico de la zona de estudio mediante SIG

El peligro en las zonas costeras susceptibles a presentar un tsunami está dado por diversos factores, uno de los más relevantes es la geomorfología, en especial las barreras naturales, las cuales pueden haber sido modificadas por el hombre, cambiando el grado de peligro.

Las bases de datos de un sistema de información geográfica, nos permiten mantener la información de muchas variables que pueden ser incorporadas para la clasificación de la costa y sus unidades espaciales, las cuales varían desde unos pocos metros o cientos de metros, hasta algunos kilómetros de longitud.. Para la interpretación se consideró la escala a la que se presentaría el mapa, la cual se definió como 1: 25 000. No queda claro el por qué de la cita

Para determinar las unidades geomorfológicas se realizó un proyecto en ArcMap, con el sistema de coordenadas WGS1984 en UTM y se especificó la zona a la que pertenece el área, que para la porción oeste de Oaxaca es la zona 14. La interpretación se realizó en una capa nueva sobre la imagen del área de estudio, y se representó mediante polígonos las unidades geomorfológicas. Las geoformas contienen una serie de características que nos permiten diferenciar de manera precisa entre ellas, por lo que antes de realizar la interpretación detallada del área, se formuló una leyenda mediante dos procesos, el primero usando un modelo análogo, es decir, el tipo de geoformas que se espera encontrar en un ambiente similar al de la zona de estudio, y el segundo fue la observación del área de estudio tanto en campo, como en el mosaico de imágenes ya realizado. Esto permitió elaborar una leyenda preliminar, que a lo largo de la interpretación se modificó y se presentan a continuación²

² En el Anexo 2 se describen cada una de las geoformas

- | | |
|------------------------|-----------------------------|
| 1.- Playa | 10.- Planicie aluvial |
| 2.- Barra | 11.- Planicie de inundación |
| 3.- Cordones litorales | 12.- Meandro abandonado |
| 4.- Planicie Costera | 13.- Cauce de río |
| 5.- Laguna | 14.- Planicie ondulada |
| 6.- Marisma de manglar | 15.- Montículo de arena |
| 7.- Marisma salina | 16.- Lomerío |
| 8.- Pantano | 17.- Cuerpo de agua |
| 9.- Estero | |

4.3. Modelo Digital de Elevación (MDE)

Los modelos digitales de elevación son representaciones digitales de la superficie terrestre, extensamente usados en los sistemas de información geográfica en tareas de análisis y visualización (Aronoff, 2005). En la elaboración del mapa geomorfológico y el de peligro de inundación por tsunami es indispensable tener en cuenta las elevaciones de las geoformas.

Para analizar las alturas se utilizó un MDE, debido a que las curvas de nivel disponibles se encontraban cada 20 m en los mapas topográficos en escala de 50,000; por lo tanto, no fue posible realizar una interpolación con el detalle requerido en el estudio

El MDE utilizado fue el proporcionado por la NASA-JAXA, conocido como ASTER GDEM y tiene un tamaño de pixel de 30 m, proporcionando mejor detalle que el dado por la interpolación de las curvas de nivel disponibles para el área. Este MDE es generado a partir de imágenes de satélite y métodos de fotogrametría y restitución. La finalidad del MDE es sobreponerlo al área de estudio y de esta forma obtener los datos de elevación durante la interpretación geomorfológica de la imagen, posteriormente, también fue utilizado para definir las zonas de peligro por inundación de tsunami.

4.4 Elaboración de un mapa de peligro mediante el mapa geomorfológico y el MDE

Existen estudios que describen cómo los SIG nos ofrecen oportunidades reales de realizar investigaciones detalladas a nivel regional y local, sobre posibles efectos de desastres naturales como tsunamis (Wood y Good, 2004). En este trabajo se le dio mayor peso a la geomorfología, pero pesar de que juega un papel muy importante para determinar el peligro por tsunami en una zona, debemos tener en cuenta que no es la única variable que define el peligro y entre más variables, el resultado será más apegado a la realidad. Las variables que se consideraron para crear un modelo o mapa del peligro por tsunami son: la geomorfología, la altura de las geoformas y la distancia tierra adentro.

La clasificación de peligro por geoforma se realizó con base en experiencias de tsunamis anteriores, en las cuales se ha visto que las geoformas se comportan de manera diferente ante este fenómeno, elevando o disminuyendo el nivel de peligro respecto a su forma (Cisternas et al., 2005)

Por lo anterior, primero se asignó un valor de peligro a cada una de las geoformas, con el cuál, obtuvimos un nuevo mapa de polígonos (tabla 2). Como se puede observar, la mayoría presenta un peligro elevado y algunas geoformas corresponden a dos clasificaciones, por ejemplo, el lomerío puede tener un peligro de medio a nulo, dependiendo de su altura, ya que en casos extremos puede incluso presentar valores altos de peligro. Con altura de más de 35 m, se le asignaba una clasificación de peligro bajo.

Tabla 2. Tipo de peligro por geoforma

Unidades	Peligro Alto	Peligro Medio	Peligro bajo o nulo
Barra	X		
Cordones Litorales	X		
Cuerpo de Agua	X		
Estero	X		
Laguna	X		
Lomerío		X	X
M. Mangle	X		
M. Salina	X		
Meandro	X		
Montículo de Arena	X		
Planicie Aluvial	X		
Planicie de Inundación	X		
Planicie Ondulada	X	X	
Playa	X		
Río	X		

Posteriormente, en el caso de la altitud se determinaron 4 categorías de peligro, basadas y modificadas de un modelo previo (Patton y Dengler, 2006), tomando como base el peor escenario del gran tsunami de 1787 , con magnitud de 8.6 (Núñez et al., 2008; Suárez y Albin, 2009)

Categorías	Elevación ³
1.- Muy Alto	0-3 m
2.- Alto	3-10 m
3.- Medio	10- 35 m
4.- Bajo o nulo	35m o más

(Categorías. Modificado, Patton y Dengler 2006).

³ La elevación es considerada a altura media del mar.

Para reclasificar el mapa del peligro con la variable de altitud, se dio un valor numérico a cada polígono, y otro valor dependiendo de su altitud a los mismos polígonos, representados en otra capa.

Las mediciones de las elevaciones se realizaron de manera manual en el MDE usando ArcMap, debido a que al tratar de obtener los valores mayores mediante una operación, el MDE mostraba algunos valores que se disparaban con alturas demasiado elevadas, que no se apreciaban en el terreno durante la interpretación. Pueden representar alturas de árboles o estructuras o incluso puede ser un error del MDE, y para evitarlo, se hizo la interpretación de la elevación con el MDE y las imágenes satelitales.

Al final se unieron y se sumaron los valores de la clasificación de peligro por geoforma y por elevación, dando una nueva clasificación. En el estudio se dio mayor peso a la variable geomorfológica, y por lo tanto a los valores obtenidos en el mapa de peligro por geoforma.

Por último, para realizar un mapa de peligro que considere la distancia desde la línea de costa, se sobrepusieron los valores del peligro por geoforma y por elevación unidos, y 15 valores de distancia, que corresponden a cada 400 m a partir de la línea de costa, hasta llegar a los 6 km. Como resultado se tiene un nuevo mapa raster con valores que incluyen la distancia y la geomorfología.

Una vez combinada la información, se interpolan los valores para obtener zonas de transición gradual del peligro, considerando que el peligro se interpreta de mejor manera mediante límites degradados entre categorías de peligro, ya que en la naturaleza no existen límites duros.

Para generar límites difusos entre las categorías de peligro finales, se quitaron las líneas (tanto las de los polígonos como de las líneas generadas a partir de la línea de costa cada 400 m) en el mapa raster, a demás de eliminar dichas líneas, se les quitaron los valores a 80m de la línea por debajo y 80m sobre la línea limite de cada

clase. De esta manera, en el mapa raster quedaron varios “huecos” de 160 m, donde antes estaban las líneas. Esto tiene como finalidad que los huecos se rellenen mediante interpolación, lo cual da como resultado límites difusos entre una categoría y otra..

Para realizar la interpolación a partir del mapa se generó un mapa de puntos cada 20 metros (distancia horizontal). La interpolación fue realizada mediante la herramienta de ArcMap “*topo to raster*”, la cual presenta un proceso de interpolación con el método iterativo infinito, el cual calcula de manera global los datos que pertenecen a los espacios donde no hay información. De esta manera, se obtuvieron los valores correspondientes para los espacios vacíos, suavizando los límites y creando un degradado de las zonas de peligro. Por último se desarrolló la leyenda al mapa degradado para su posterior interpretación (Fig. 17).

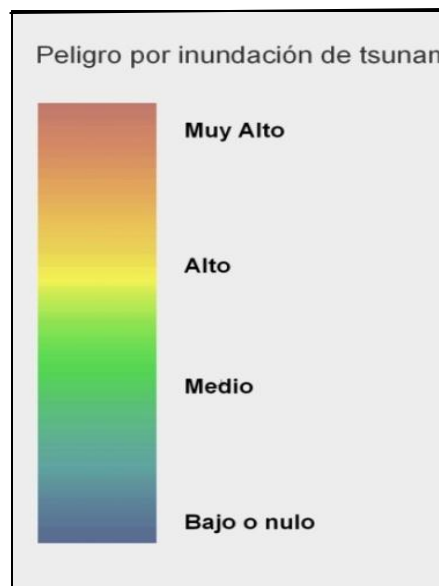


Figura 17. Categorías de peligro generadas mediante límites degradados

4.5 Perfil topográfico de campo

Con la finalidad de analizar con más detalle las alturas cercanas a la costa, se realizaron dos perfiles topográficos con el distanciómetro Tru Pulse 200. Las zonas elegidas tienen como vértice de origen las coordenadas siguientes:

Perfil 1	Perfil 2
X: 591640 E	X: 591472 E
Y: 1791347	X: 179094E



Figura 18. **Perfiles topográficos cerca de la laguna Corralero, Google Earth, 2012**

La elaboración de los perfiles fue realizada a las 12 PM aproximadamente, mediante el uso de una brújula, un indicador para altura, un sistema de posicionamiento global y el distanciómetro Tru Pulse 200. La toma de datos fue dada en cada cambio en el relieve. Lo cual se ilustra mejor en la figura 22.

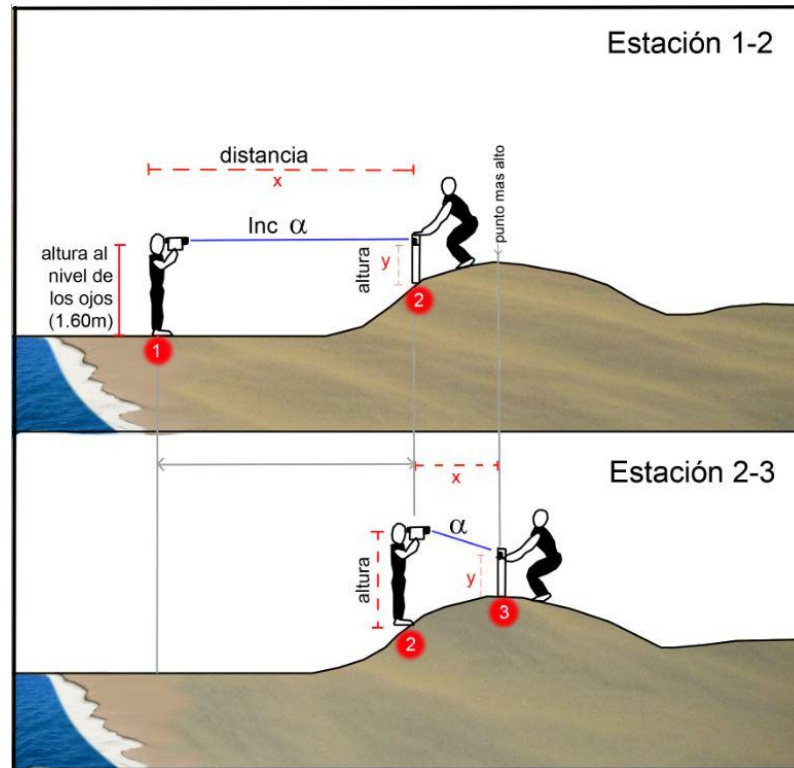


Figura 19. Toma de puntos en el perfil topográfico

Los perfiles se realizaron entre 2 personas, una se encargó de hacer las mediciones con el distanciómetro, mientras que la otra colocaba el estadal. El perfil se orientó lo más posible hacia el norte, debido a que en ocasiones objetos grandes como árboles, vegetación muy espesa o incluso casas obstruían el trayecto. El estadal tiene una altura de 90 cm. El procedimiento para realizar el perfil del terreno fue mediante un estadal y nivel de mano, el terreno se dividió el perfil en estaciones, cada estación dada por 2 puntos, el primero es donde la persona inicia la toma, el segundo punto es donde existe un cambio significativo del relieve, notable a la vista, y se coloca el estadal. Se realizaron aproximadamente 45 tomas por perfil.

Este perfil topográfico permitió la detección más detallada de los cambios en el relieve, en al menos dos puntos muy importantes en caso de inundación por tsunami. Los datos de los perfiles se utilizaron para la calibración de las alturas y verificación de las elevaciones del MDE que se utilizó para elaborar el mapa de peligro.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Mapa Geomorfológico

Los diferentes procesos de erosión, transportación y depositación han moldeado la zona de estudio durante miles de años, generando las geoformas actuales, mismas que se representan en el mapa geomorfológico. Son principalmente de origen fluvial y marino, que Hay grandes áreas con elevaciones bajas, aunque también hay otras de lomeríos.

En el mapa de unidades geomorfológicas se identificaron en total 17 diferentes tipos de geoformas. Las cuales se resumen a continuación:

Tabla 3 Proceso de formación de las geoformas del área de estudio

Geoformas	Procesos de formación
Playa	Marino
Barra	Marino
Cordones litorales	Marino
Planicie costera	Marino
Laguna	Fluviomarinos
Marisma de manglar	Fluviomarinos
Marismas salinas	Fluviomarinos
Pantanos	Fluviomarinos
Esteros	Fluviomarinos
Planicie aluvial	Fluviales
Planicie de inundación	Fluviales
Meandro abandonado	Fluviales
Cauce de río	Fluviales
Planicie ondulada	Fluviales
Lomeríos	Ígneo- tectónico
Cuerpos de agua	Antrópico
Montículos de arena	Antrópico

Se encontró que la zona está dominada por tres geoformas principalmente (Figura 20): la planicie aluvial, los lomeríos y los cordones litorales, juntos representan el 72% del área de estudio.

Los lomeríos deben ser formas del relieve endógeno modelado, esto es, tectónico-erosivo. No hay ígneo-tectónico, el relieve volcánico endógeno es volcánico y tectónico (incluye el magmático intrusivo).

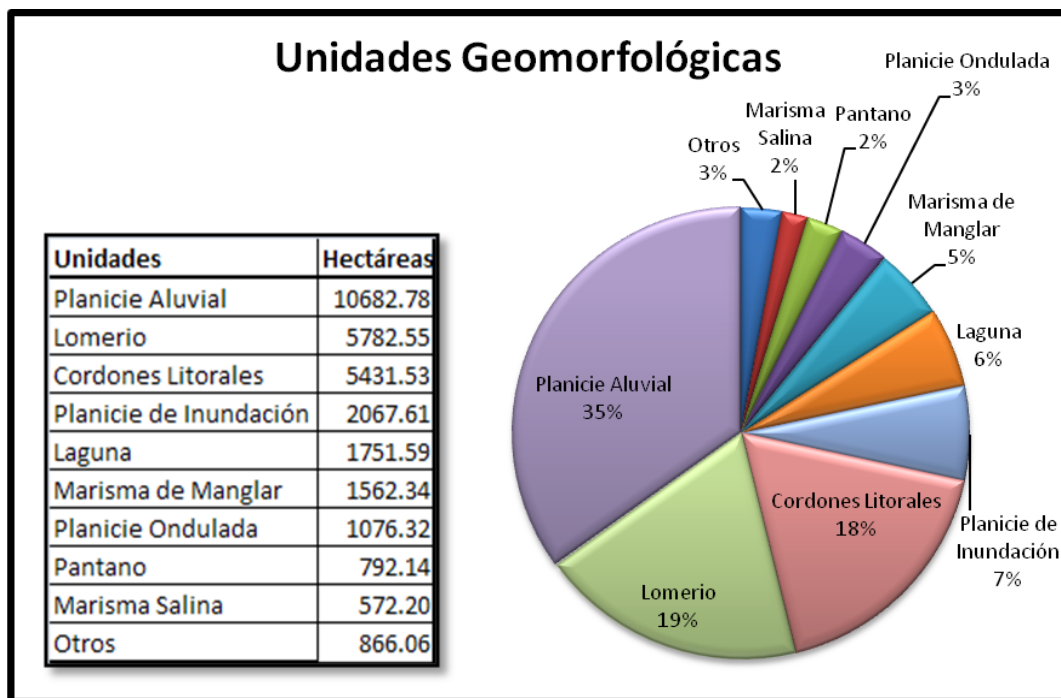


Figura 20. Porcentajes de las unidades geomorfológicas en el área de estudio

La planicie aluvial se extiende a una distancia aproximada de 1.5 km de la línea de costa, tierra dentro, hacia el noreste, con una altitud dominante de 5-6 metros, con selva baja caducifolia y cultivos, así como extensas áreas de ganadería (Figura 21).

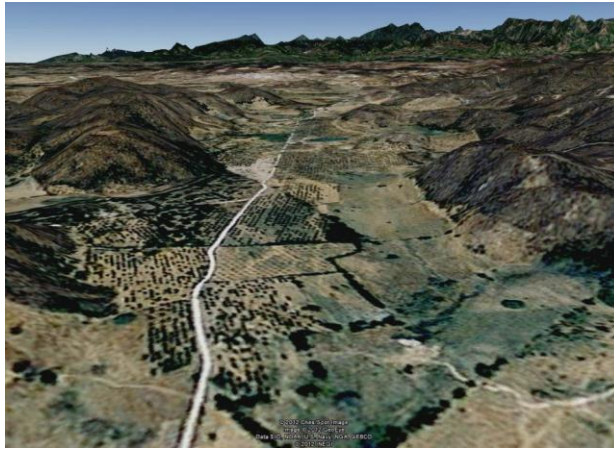


Figura 21. Perspectiva oblicua de la planicie aluvial entre lomeríos. Imagen satelital obtenida en Google Earth, con exageración en la escala vertical de 2 veces la real.

Los lomeríos se encuentran distribuidos en la parte norte de la laguna y al sur de la zona de estudio principalmente (Figura 22), la vegetación es de selva baja caducifolia (INEGI, 2012). En su mayoría, son elevaciones que alcanzan más de 60 m de altura, por lo que es una zona importante para considerar en el mapa de peligro, como áreas menos susceptibles de ser inundadas por un tsunami.



Figura 22. Perspectiva oblicua de los lomeríos localizados al norte de la laguna. Imagen satelital obtenida de Google Earth, con exageración en la escala vertical de 2 veces la real.

La tercera geoforma que se encuentra con mayor frecuencia son los cordones litorales. Se distribuyen paralelos a la costa, con una altura máxima registrada de 24 m a una distancia aproximada de 3 km de la costa. En su mayoría no llegan a los 20 m de altura, en general son de 5-9 m (Figura 23 y 24).



Figura 23. Cordones litorales 1 km de distancia de la costa



Figura 24. Cordones litorales cercanos a la línea de costa

Debido a su alta composición de arena en los cordones litorales más cercanos a la línea de costa (Figura 24), la vegetación no va más allá de algunos pastizales, plantaciones de palmera, arbustos y algunas cactáceas. Sin embargo, tierra dentro pueden presentar vegetación secundaria y selva baja caducifolia (INEGI, 2012).

La planicie de inundación se ubica en donde existió flujo de agua o cerca de un cuerpo de agua o cauce de río (Figura 25). La planicie de inundación presenta agua en épocas de lluvias extraordinarias, por lo que esta zona ya no pertenece al río, en lugar de esto, a lo largo del paisaje se puede ver el registros de antiguos meandros.

La elevación de este tipo de geoformas es mínima, con una variación entre los 4 y 6 metros de altitud. La planicie de inundación es rica en pastizales, que usualmente son utilizados para el ganado.

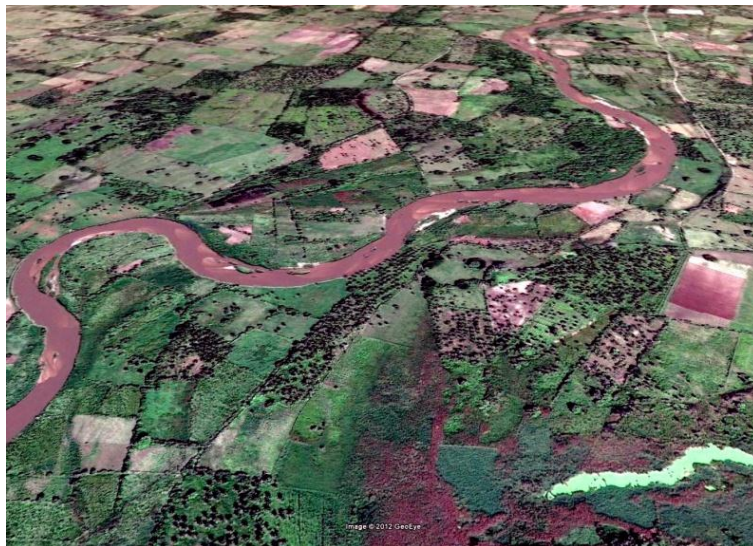


Figura 25 . Perspectiva oblicua de una sección del río que está rodeada por planicie de inundación Imagen satelital obtenida en Google Earth, con exageración en la escala vertical de 2 veces la real.

La laguna es el cuerpo de agua más importante y al que se le prestará especial atención en el mapa de peligro, por su comunicación con las localidades y las geoformas que la rodean (Figura 26). La laguna tiene una extensión de 1,751.59 ha, lo que hace que esté conectada con varias geoformas tierra dentro. Su ubicación esta

aproximadamente en el centro del área de estudio y se extiende en diversas direcciones. Debido a que la laguna está formada en una depresión, la altitud de esta es el nivel del mar y se encuentra rodeada por mangle.



Figura 26. Vista de la laguna en foto satelital vertical obtenida de Google Earth en mayo de 2012



Figura 27. Vista de la laguna en planta, cerca de su desembocadura

La marisma de manglar tiene una distribución de acuerdo con la cantidad de cuerpos de agua salino-dulce, ya que requieren este tipo de hábitat para desarrollarse (Figura 27). Se encuentran generalmente a las orillas de los esteros, pantanos y de la laguna. Al estar en zonas inundadas su elevación suele estar a menos de 6 m sobre el nivel del mar.

Las geoformas con una presencia moderada en el mapa son la planicie ondulada, los pantanos y la marisma salinas. La primera se presenta únicamente en la parte noreste de la zona de estudio, tierra adentro, con alturas de hasta 35 metros en la parte más elevada, la vegetación es principalmente la que domina en la región: selva baja caducifolia, pastizales y matorrales.



Figura 28 Pantano con mangles

Los pantanos y marismas salinas tienen una distribución más dispersa. Se extienden en áreas pequeñas pero con alta frecuencia en el área de estudio, los pantanos presentan una vegetación de mangle (Figura 18), mientras que en las salinas está ausente (Figura 29).



Figura 29. Marisma salina a las orillas de un pantano

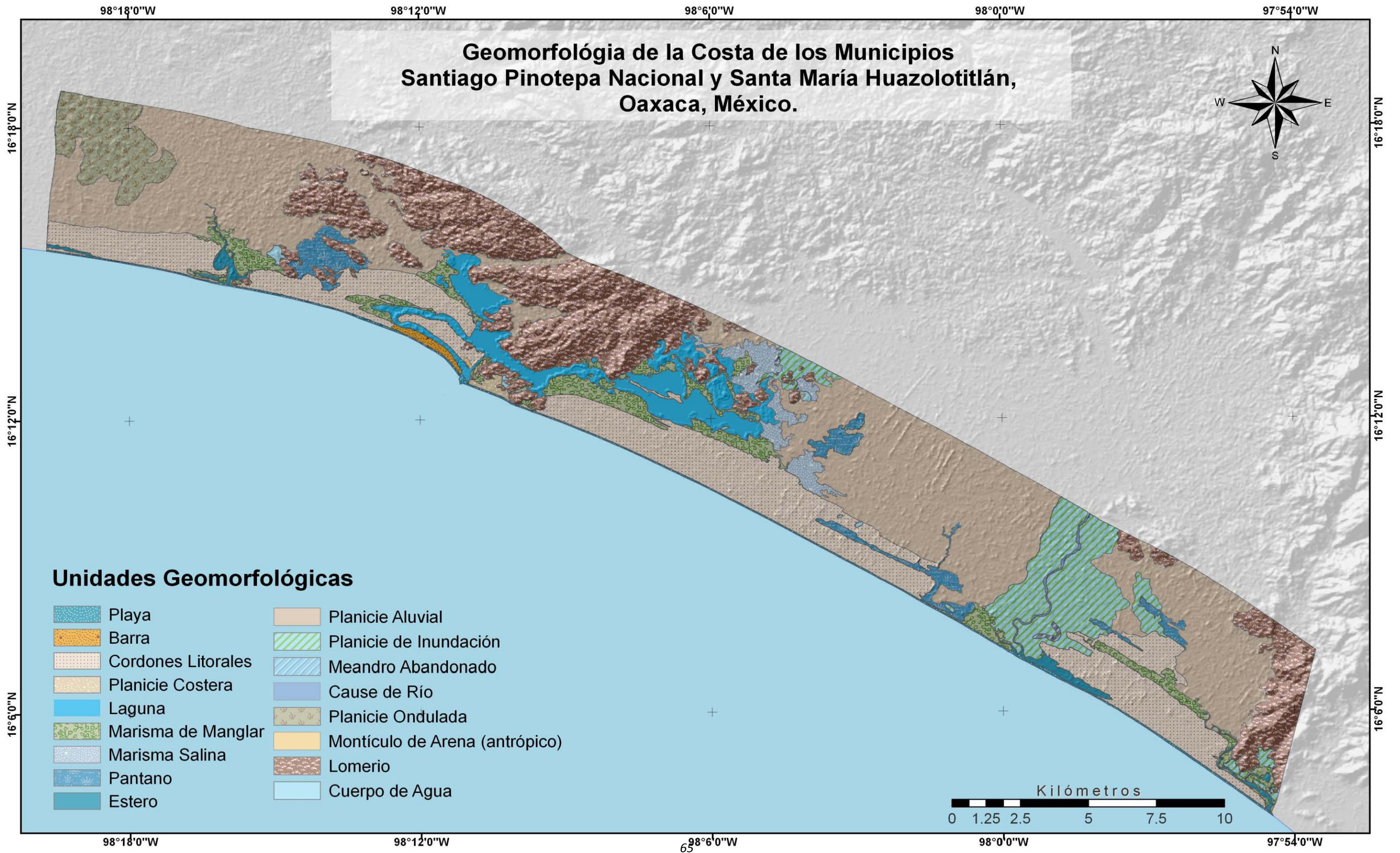
El 3% del área de estudio es de geoformas o unidades muy pequeñas o incluso únicas: la playa, esteros, barra, planicie costera, cuerpos de agua y el cauce de río. La playa al ser el área más dinámica de la costa tiene un intercambio de sedimentos con el mar que dificulta el crecimiento de vegetación, la playa es arenosa y su forma en planta es principalmente recta, orientada ONO-ESE, con una elevación no mayor a los 4 m sobre el nivel del mar. Los esteros constituyen una parte importante para la vida de los bosques de manglar y al igual que la playa poseen un área muy dinámica de intercambio de sedimentos.

La barra que se encuentra en el mapa está constituida por cordones litorales, protege a la laguna de las corrientes marinas, con elevaciones no mayores a los 12 m, su extensión a lo largo de la línea de costa es de 3 km y tiene un ancho de 300 m aproximadamente (Figura 30). Su vegetación es escasa ya que se encuentra en una zona muy dinámica, se limita a unos cuantos pastos y matorrales.



Figura 30. Sección de la barra que se encuentra entre la laguna y el mar

La clasificación geomorfológica es la base para la realización del mapa de peligro, en la cual se especifica éste por geoforma, tomando en cuenta su altura y la distancia a la línea de costa. Como se puede observar en el mapa geomorfológico, las planicies predominan en el área de estudio, por lo que son un aspecto fundamental para analizar en el mapa de peligro, ya que son zonas muy bajas. También encontramos en gran proporción lomeríos, geoformas importantes para tener sitios seguros en caso de tsunami, pero la distribución de los mismos no presenta beneficio para todas las localidades de la zona por la distancia. Por otro lado, la presencia de varios esteros (que ayudan a la expansión de las ondas provocadas por un tsunami) y de la laguna, que es el cuerpo de agua más grande, y que además, se conecta al mar, pueden representar un papel importante en el mapa de peligro. Pero antes de analizar éste, se describirán los perfiles topográficos que se realizaron para determinar de manera más exacta la variación de altitud.



MAPA 1 Geomorfología de la zona de estudio, en Oaxaca, México

5.2 Perfiles Topográficos

Los perfiles topográficos generados fueron importantes para verificar las elevaciones del MDE utilizado y su aproximación a la realidad. Se realizaron cerca de la laguna de Alotengo o Corralero, a partir de la línea de costa (Figura 31).



Figura 31. En amarillo se marcan los perfiles topográficos que se realizaron a ambos lados de la laguna (imagen satelital, Google Earth, 2012)

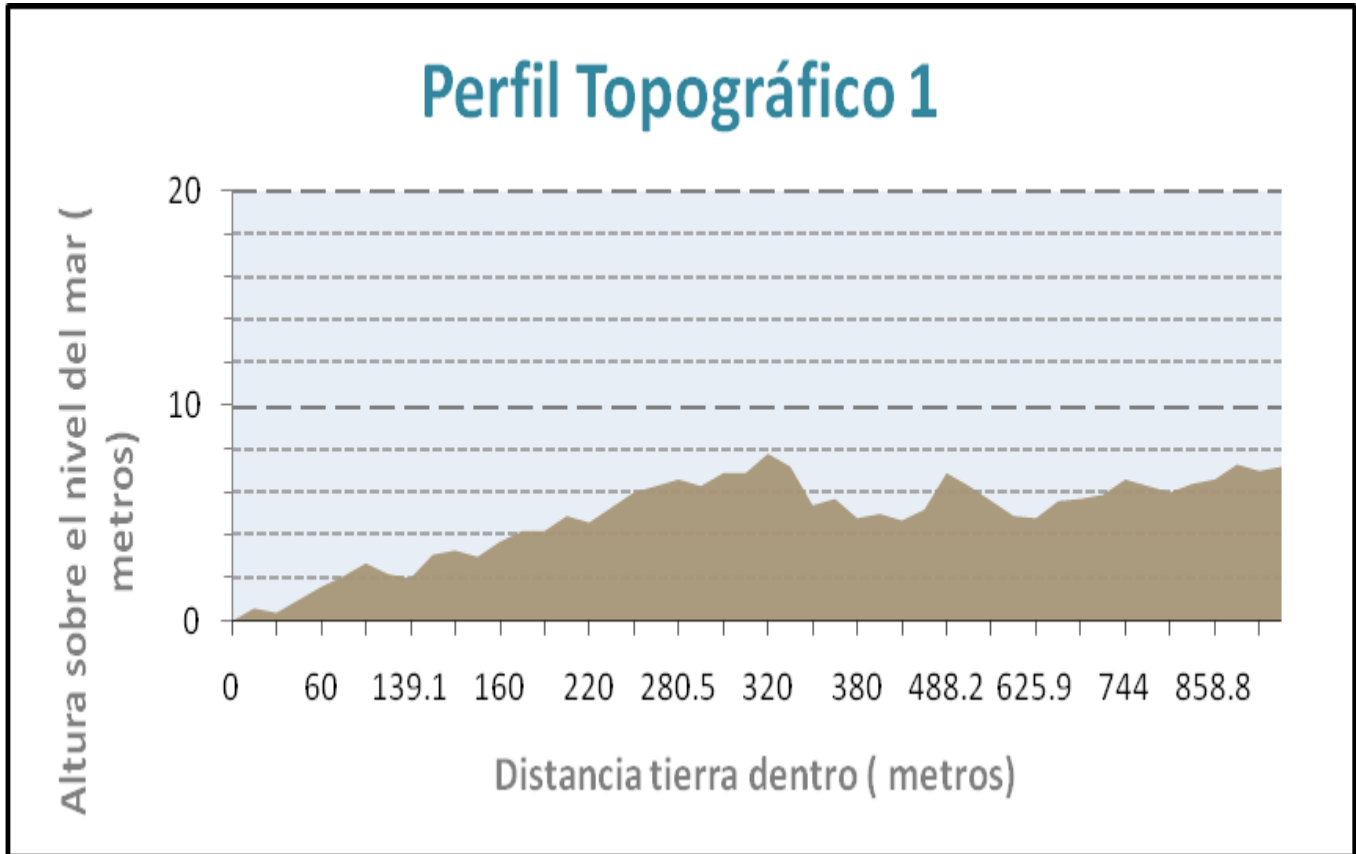


Figura 32. Perfil topográfico 1

Las se mediciones se hicieron los días 29 y 30 de mayo de 2011 a las ~3 pm y ~9 am respectivamente. Los datos de marea del Servicio Mareográfico Nacional, indican que el 29 de mayo de 2011 a las 3 pm la marea estaba a los 0.33 m s.n.m. y el día 30 de mayo de 2011 a las 9 am, la marea se encontraba a 0.5 m s.n.m.(SMN, 2012). Estos datos se utilizaron para ajustar o corregir el perfil, al nivel cero del mar.

La forma del primer perfil muestra cordones litorales, que presentan una serie de crestas con depresiones entre las mismas, con una variación no mayor a los 2 m entre punto y punto (Figura 32). Debido a que los cordones litorales son marcas de antiguas líneas de costa, se puede sugerir dos hipótesis, la primera es que la línea de costa se ha ido recorriendo hacia el mar porque el nivel del mar ha bajado o al contrario, también este patrón puede significar un levantamiento de la costa (Roy y Boyd, 1996).

La altura aumenta gradualmente tierra dentro, sin embargo, hay depresiones muy bajas alejadas de la actual línea de costa. En este perfil, se encontraron crestas con elevaciones de 7.8 m a 320 m de distancia, y crestas con elevaciones menores (4.8 m de altura) a los 626 m de distancia. Lo anterior muestra que los cordones litorales, no aumentan de manera lineal, sino que por diversos procesos las líneas de costa antiguas pueden tener mayor o menor elevación.

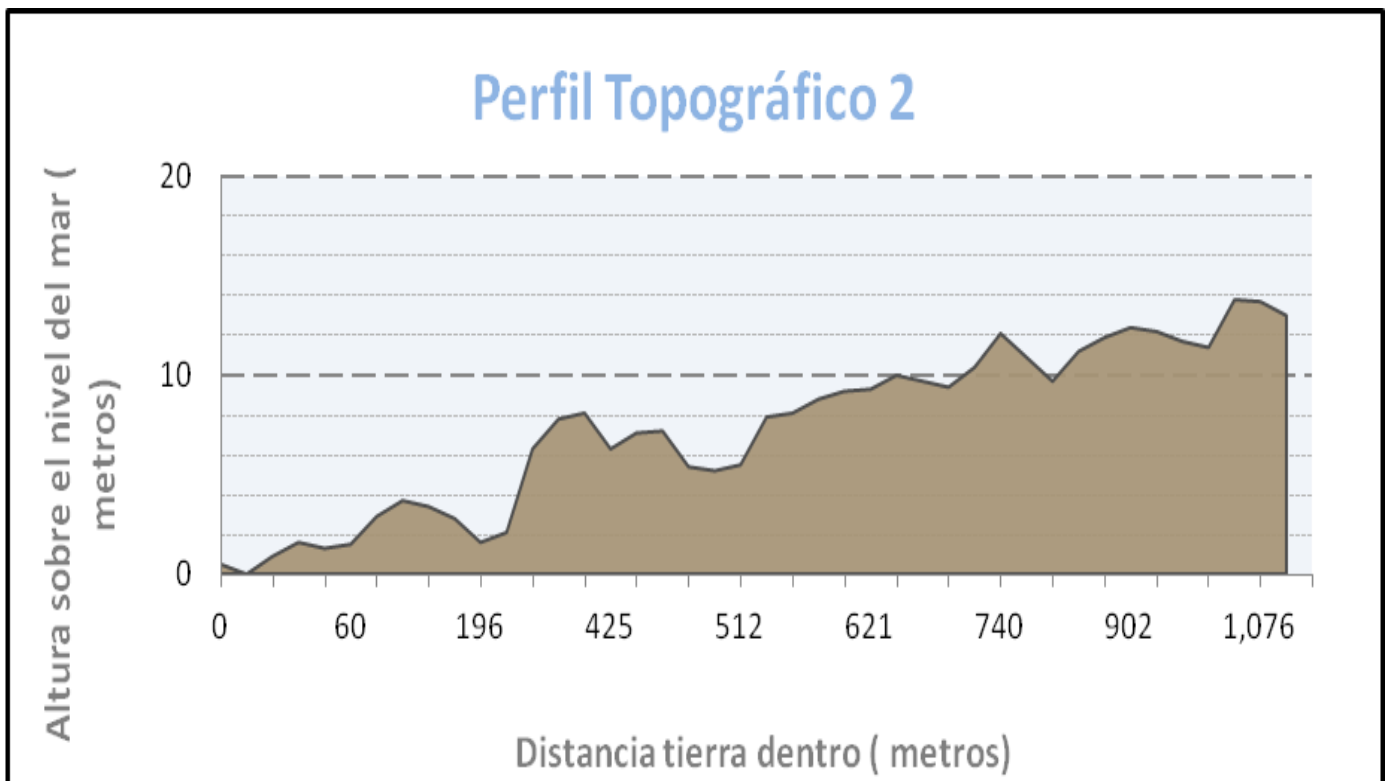


Figura 33. Perfil Topográfico 2

El segundo perfil muestra elevaciones mayores, la máxima de 13.8 m a una distancia de 1067.8 m (Figura 33). Este perfil se encuentra en un área de cordones litorales y al igual que el primer perfil, presenta la alternancia de elevaciones y depresiones características. De igual forma la elevación va aumentando con la distancia tierra dentro, mucho más marcado en este perfil que sigue elevaciones mayores.

La distancia entre el perfil 1 y el 2 es de 10 km aproximadamente, donde se extienden cordones litorales. Considerando el tamaño del área de estudio, ambos perfiles se encuentran relativamente cerca. Sin embargo, podemos ver que el patrón de aumento en la elevación tierra dentro que siguen es diferente. A partir de esto se pueden inferir múltiples teorías, ya que a pesar de estar en una misma zona, la línea costa fue siguiendo un patrón distinto en diversas áreas, posiblemente por la influencia de otros factores, como podrían ser las geoformas que los rodean.

Comparando los valores de altura del DEM y las obtenidas de prospección de campo, se pudo corroborar que existe una variación de algunos metros (entre 3 y 5). La escala utilizada en los mapas permite la interpretación por medio del DEM, aún con esta variación. Sin embargo, se plantea en un futuro la realización de más perfiles topográficos con la finalidad de ajustar el DEM de elevación Aster utilizado.

5.3 Mapa de peligro por inundación de tsunami

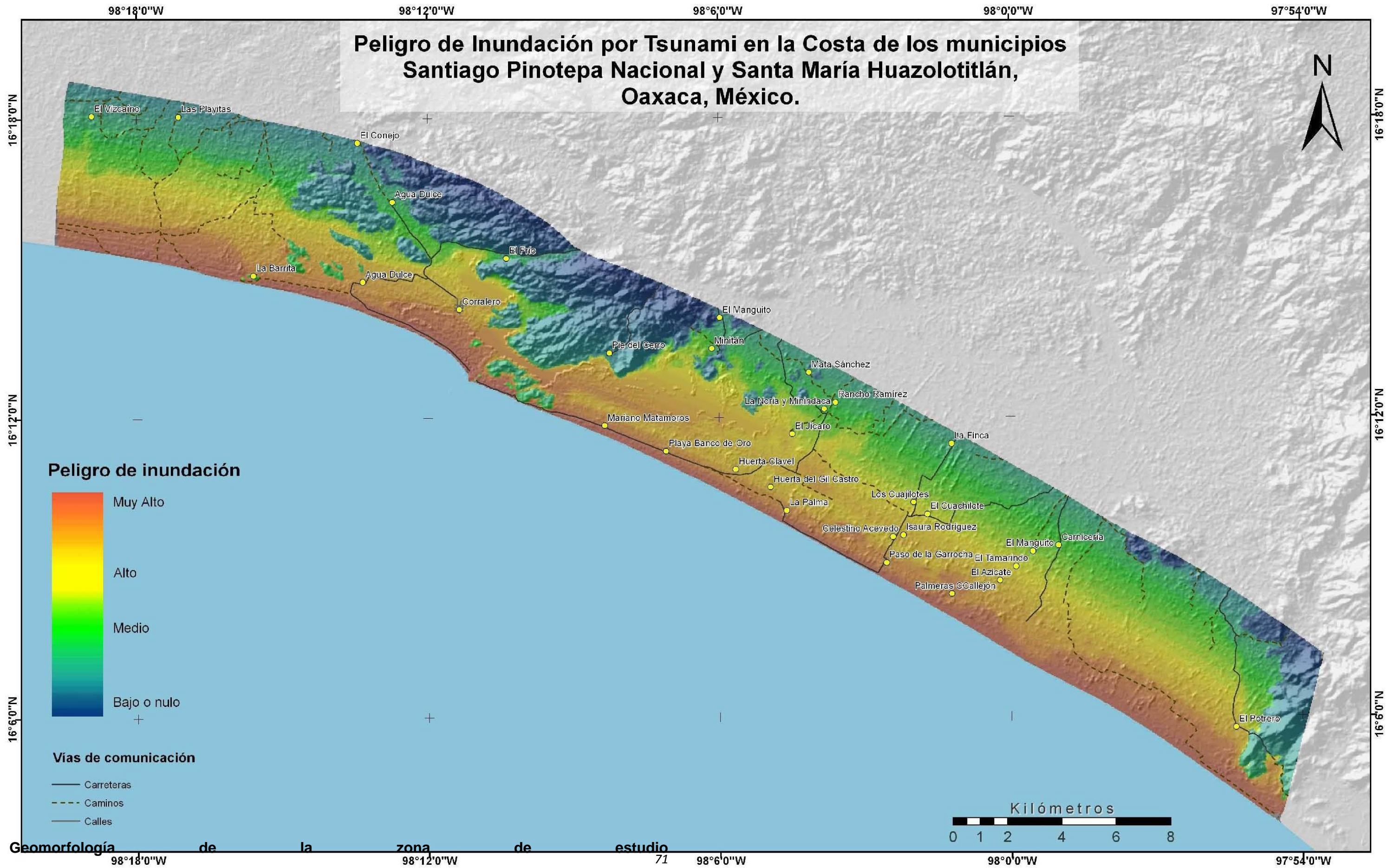
El mapa de peligro tuvo como base el mapa geomorfológico, la elevación y la distancia a la línea de costa. Estos criterios nos permiten saber qué áreas tienen mayor peligro para ser inundadas en caso de tsunami. Las categorías de peligro se dividen en 4, muy alto, alto, medio y bajo o nulo (mapa 3). En la primera categoría, peligro muy alto, en color rojo, encontramos elevaciones muy bajas o moderadas (~10 m), cercanas a la línea de costa, hasta 1.5 km aproximadamente, en geoformas que no son cuerpos de agua; esta categoría también puede presentarse hasta los 2.5 km en lagunas, esteros o pantanos.

La segunda categoría de nivel alto, corresponde a las tonalidades amarillas, donde podemos encontrar principalmente geoformas con elevaciones bajas, a mayor distancia de la línea de costa o a las orillas grandes cuerpos de agua, como es el caso de la laguna.

La tercera categoría, de peligro medio, en tonos verdes, son elevaciones muy bajas, distantes de la línea de costa desde 3 km, para algunos casos, y se extiende hasta 6 km tierra dentro. O por el contrario cercano a la línea de costa, con elevaciones grandes.

La cuarta categoría, en azul, corresponde a un peligro bajo o nulo, en zonas muy alejadas de la línea de costa, a 6 km o más, y en algunos lomeríos. Aunque no se utilizaron cotas para los límites entre las categorías de peligro, se tomó en cuenta que a una distancia menor o aproximada a 50 m de la línea de costa, el peligro es muy alto, sin importar qué tipo de geoforma se encuentre, esto es exclusivo para el caso la zona de estudio (UGM, 2010).

Para la descripción del peligro, primero se consideran a las geoformas fluvio-marinas, por su origen cercanas a la línea de costa. La playa es la geoforma más expuesta a un tsunami, y donde se ven sus primeros efectos. A lo largo de la zona de estudio, la playa se extiende hasta los 100 m tierra dentro, a excepción del área que rodea la entrada de la laguna al mar, ahí la playa tiene una extensión de 100 m, con muy poca una categoría de peligro muy elevado. Otra geoforma es la barra, que se extiende a lo largo de 3 km aproximadamente, paralela a la línea de costa, a un lado de la playa y de la laguna, con una altura no mayor de 12 m. El peligro es muy elevado.



MAPA 2. Peligro por inundación de tsunami en la Costa de Oaxaca, México

Los cordones litorales son la geoforma con mayor extensión cerca de la línea de costa y en algunas zonas alcanzan los 3.5 km tierra dentro. Esto significa que gran parte de la zona cerca de la línea de costa presenta elevaciones muy bajas, y la vegetación es de pocos metros de altura (entre 2 y 8 m), a excepción de algunas palmas. Las crestas de los cordones litorales en su mayoría no alcanzan elevaciones mayores a los 10 m (Figuras 32 y 33) Toda esta área presenta un peligro muy alto cerca de la línea de costa, y peligro alto para los cordones litorales que están a aproximadamente 1 km tierra dentro. De baja proporción son las planicies costeras, cerca con un peligro muy alto debido a su exposición y escasa elevación.

Los esteros son un cuerpo de agua que se conecta al mar, por lo que las ondas de un tsunami pueden penetrar provocando resonancia y la propagación de sus ondas tierra dentro. Los esteros favorecen el ingreso del tsunami, por lo que tienen la categoría de peligro más elevado.

En la zona de estudio encontramos cuatro esteros, rodeados principalmente por marisma de manglar y cordones litorales, y en menor proporción por planicies de inundación; las tres geoformas son susceptibles a inundación por tsunami.

Las marismas de manglar se ubican alrededor de cuerpos de agua con cierto nivel de salinidad, como los esteros, lagunas, pantanos, etc., y poseen vegetación de mangle que puede representar una barrera para un tsunami de baja intensidad, pero en el caso de uno poderoso como el de 1787, sólo ocurre fricción. En este estudio se considero el peor escenario. En los pantanos o en la laguna, las marismas de manglar pueden distribuirse a las riberas, por lo que no están tan cerca de la línea de costa. Pero es la resonancia de las ondas del tsunami eleva el nivel de peligro incluso a los 4 km tierra dentro.

La laguna es el cuerpo de agua con mayor extensión del área de estudio, con una longitud de más de 10 km, el 6% del área de estudio, y un punto esencial para analizar

el peligro, debido a que a sus alrededores se encuentra ubicada la mayor parte de la población. Presenta una categoría de peligro muy alto en casi toda su extensión, con excepción de algunos lomeríos cercanos.

La parte norte de la laguna presenta lomeríos, lo que es una ventaja para que no penetren más las ondas producidas por tsunamis. Sin embargo pueden aumentar su altura, generando peligro a las zonas cercanas. Se requiere de la modelación del peor escenario de tsunami para corroborar esto.

Las marismas salinas del área poseen poca o nula vegetación, presentan elevaciones bajas y depresiones, que fueron parte de la laguna. Están ubicadas al este y noreste de la laguna. Podrían ser afectadas por en el caso de un gran tsunami, por lo que el peligro es alto. Se encuentran esta desde los 1.5 km hasta los 6 km tierra dentro, así, las más alejadas de la línea de costa, a pesar de su baja elevación, presentan una categoría de peligro medio.

Los pantanos se distribuyen a diferentes distancias de la línea de costa, lo mismo a poco más de 100 m que a 5 km tierra dentro. Tienen un peligro cerca de la línea de costa, ya que en varios casos presentan poca vegetación secundaria y mangles. Hay 5 pantanos, uno en la categoría más alta de peligro, muy cercano al mar; dos en un peligro de muy alto a alto, aproximadamente de 1 a 2 km tierra adentro y rodeados de zonas bajas. Por último, 2 pantanos se extienden a mayor distancia de la línea de costa, a partir de los 3 km, con un peligro de alto a medio.

Las geoformas fluviales están bien expuestas en el área de estudio, como la planicie aluvial que predomina con el 35%. Es la de mayor extensión. Se extiende en su mayor parte a partir de 1 o 2 km tierra adentro y presenta las 4 categorías de peligro, en donde el alto y medio definen la mayor parte de su extensión. El de grado bajo se encuentra en las zonas más alejadas de la línea de costa, aproximadamente a los 5.5 km o más, y en menor proporción las zonas de planicie aluvial con peligro muy alto, corresponden a una extensión de la planicie que se encuentra a menos de 1 km de la línea de costa.

Las planicies de inundación en el caso de tsunami están muy expuestas. El peligro varía por su distancia tierra adentro y por las geoformas que la rodean. En algunos casos se encuentran aproximadamente a medio kilómetro de la línea de costa y a un lado de esteros, por lo que el peligro es muy alto; su máximo alejamiento es de hasta 6 km, donde el peligro disminuye gradualmente de alto a medio.

El meandro abandonado es una geoforma única y su relación con el peligro es de grado muy alto por su cercanía a la línea de costa, aproximadamente a 1 km y por su elevación baja y por su posición en una ribera y próximo a un estero. El cauce del río tiene 3 categorías de peligro, dependiendo su distancia a la línea de costa. A pesar de que el peligro disminuye tierra adentro, el cauce presenta un peligro muy alto y alto hasta los 4 km aproximadamente, porque el río puede canalizar las ondas del tsunami. A partir de los 4 km aproximadamente, el peligro pasa a una categoría media de peligro.

La planicie ondulada, situada en la parte noroeste de la zona de estudio, tiene una extensión de 1 076.2 ha aproximadamente, la cual se distribuye a partir de los 2 km hasta los 6 km tierra adentro. Debido a que tiene elevaciones, en su mayoría de 20 m aproximadamente, y por su distancia a la línea de costa, la categoría de peligro es medio y bajo. Las zonas más próximas a la línea de costa tienen menor elevación y presentan un peligro alto de inundación.

Los lomeríos son geoformas de origen ígneo-tectónico, presentes en alta proporción (19%) en el área de estudio. Su altura varía de unos pocos metros hasta cientos. El peligro en muy pocos casos es medio (cerca de la línea de costa con elevaciones de 20 a 40 m de altura) y en su mayoría bajo o nulo. Se encuentran también lomeríos a menos de 1 km de la línea de costa pero con elevaciones mayores a los 50 m, por lo cual tienen un peligro bajo o nulo. Al norte de la laguna tienen elevaciones de hasta 77 m en la ribera de la laguna, constituyen una gran barrera contra las ondas de tsunami, además de encontrarse a más de 1 km de distancia de la costa. Los lomeríos de la

zona de estudio alcanzan hasta los 180 m de altitud, por lo que son zonas con un peligro nulo de inundación por tsunami.

En la zona de estudio, existen cuatro cuerpos de agua relativamente pequeños, dos de ellos parecen ser parte de zonas que anteriormente estaban inundadas y fueron quedando aisladas. Los otros dos tienen un área menor a los anteriores, por su forma pueden ser de origen antrópico, esto se puede apreciar en las imágenes satelitales.

La última geoforma es de origen antrópico y consiste en pequeños montículos de arena que no sobrepasan los 9 m de altura. Se pudo verificar con los habitantes que son de arena removida de la laguna, para abrir de manera permanente la desembocadura al mar. En caso de un gran tsunami la arena puede ser arrastrada muy fácilmente, se encuentran a una distancia menor a un kilometro de la línea de costa, por lo que pertenecen a la categoría de peligro más elevado.

Análisis del peligro de tsunami en las poblaciones

Además de los niveles de peligro, en el mapa se representan las 32 poblaciones que hay en la zona de estudio, su distribución y las vías de comunicación. La mayor parte de las poblaciones se ubica en la zona de peligro muy alto y alto. Corralero, con mayor número de habitantes, se encuentra ubicada a la orilla de la laguna y no tiene rutas de evacuación rápidas, por lo tanto, corre peligro en caso de un gran tsunami.

Las poblaciones que se encuentran ubicadas dentro de la categoría de peligro muy alto son cinco: Mariano Matamoros, Playa Blanco de oro, La Palma, Paso de la Garrocha y Palmeras Callejón. Están ubicadas principalmente en cordones litorales, muy cerca de la línea de costa. Se conectan entre sí por un par de carreteras, sin embargo, la ubicación de las vías de comunicación no es buena, debido a que están en cordones litorales, rodeando la laguna y muy cerca de esteros. Además, gran parte del camino que las une, se encuentra paralelo a línea de costa, impidiendo la evacuación pronta tierra dentro.

Las poblaciones que encontramos en zonas de alto peligro son doce: Agua Dulce, Corralero, Huerta Clavel, El Jícara, Huerta de Gil Castro, Celestino Acevedo, Isaura Rodríguez, El Cuachilote, Los Cuajilotes, El Azicate, El Tamarindo y El Potrero. Se ubican principalmente en la planicie aluvial, a los alrededores de la laguna y del río, cerca de los cuerpos de agua, pero no se beneficia en caso de inundación por tsunami.

En la zona de peligro medio hay nueve poblaciones: El Vizcaíno, Agua Dulce ⁴, Minitán, La Noria y Minindaca, Rancho Ramírez, La Finca, El Manguito y Carnicería, de las cuales seis se encuentran muy cerca de los lomeríos, considerando el peligro medio y la distancia a los lomeríos, estas poblaciones podrían tener rutas rápidas de evacuación en caso de peligro por inundación. Las otras dos poblaciones se encuentran en zonas con relieve moderado o incluso plano, pero la distancia a la línea de costa, que supera los 4 km les permite evacuar por la carretera principal. En el mapa se encuentra la población La Barrita, muy cerca de la línea de costa, en un lomerío, muy por lo que el peligro aquí es medio.

Por último, en la zona de peligro bajo o nulo encontramos seis poblaciones: Las Playitas, El Conejo, El Frio, Pie de Cerro, El Manguito 2, Mata Sánchez y La Barrita, mismas que se encuentran muy lejos, a 6 km en una zona con relieve moderado o en los lomeríos. Un gran tsunami no representa riesgo, sin embargo siempre se recomienda buscar lugares más altos.

En general, en el mapa de peligro, se puede observar que el área de las categorías de peligro muy alto y alto tiene la mayor extensión, a pesar de que en el mapa de geoformas se observa una gran proporción de lomeríos que se consideran de peligro bajo o nulo. Esto se debe en gran parte a que las demás geoformas tienen un valor de peligro alto.

⁴ En la zona de estudio dos localidades tienen el mismo nombre repetido: Agua Dulce y El Manguito, por lo que durante el trabajo se les **nombró arbitrariamente Agua Dulce y Agua Dulce 1, El Manguito y el Manguito 1.**

Se recomienda que con ayuda del mapa de peligro por inundación y la localización de sitios altos, se establezcan rutas de evacuación. Es por esto que en el mapa se prestó importancia a la ubicación de los lomeríos, principalmente en las zonas donde es más recurrente la población, como en la laguna, donde un porcentaje de las poblaciones cercanas llegan a descansar en la sección de la laguna que se une con el mar. Además de ser fuente y sitio de trabajo para los pescadores de la zona.

Es necesario considerar que la zona de estudio se encuentra en Oaxaca, un estado que presenta alta marginación y un índice de pobreza muy elevado (40.5% de su población en situación de pobreza), y su infraestructura no es la adecuada para poder responder bien a estos eventos. Como se observa en el mapa de peligro, las vías de comunicación son escasas y en su mayoría son caminos de terracería de malas a muy malas condiciones; y en el caso de un tsunami pueden ser bloqueadas, dado que atraviesan cuerpos de agua (Figura 34). Las viviendas en casi toda la zona son pequeñas y modestas, en su mayoría de cemento y madera (Figura 35) (CONAPO, 2010; CONEVAL, 2010).



Figura 34. Caminos en malas condiciones del área de estudio



Figura 35. Viviendas de Corralero, Oaxaca. Comunidad a la orilla de la laguna

Oaxaca se encuentra en el tercer lugar entre los estados con mayor índice de analfabetismo (INEGI, 2011). El mapa que aquí se presenta es una herramienta de fácil interpretación, que ilustra de manera adecuada las zonas que se encuentran bajo peligro por inundación de tsunamis. Debido a su carácter descriptivo e ilustrativo, permite la divulgación de dicha información entre los pobladores, quienes deben conocer de la situación de peligro en caso de tsunami en que se encuentran, y de esta manera proponer e identificar rutas de evacuación. Sin embargo, para que todo esto suceda también se debe informar a los habitantes cómo identificar las señales de la naturaleza sobre un posible arribo de un tsunami.

La generación de información sobre un fenómeno que es casi desconocido por la población mexicana es de gran relevancia y de vital importancia su divulgación, además se deben impulsar estudios posteriores que permitan llevar una gestión del sitio, dado que la mejor forma de prevenir estos fenómenos es mediante el conocimiento de los mismos.

La incorporación de la geomorfología en la evaluación del peligro por tsunami permite ampliar el conocimiento del fenómeno en la costa. Se ha comprobado que las barreras naturales son de utilidad en la protección de la costa y se ha demostrado la diversidad de efectos importantes de los tsunamis en función a la geomorfología (Hart y Knight, 2009). Los resultados aquí presentados son un aporte al estudio de tsunamis en México, ya que son escasos los realizados. Además, este tema tiene gran relevancia en el estado de Oaxaca, el cual tiene una larga historia sísmica, con un evento como el sismo con magnitud de 8.5 en 1787, que generó un gran tsunami (Núñez et al., 2008).

6. CONCLUSIÓN

Se comprobó mediante el análisis de tres variables, la geomorfología, la distancia a la línea de costa y la altitud de las geoformas, que la zona de estudio presenta un alto peligro por inundación de tsunamis. Esto se debe a que las características geomorfológicas del lugar, en su mayoría corresponden a un relieve bajo, muy susceptible a inundación. A pesar de contar con un alto porcentaje de lomeríos, esto no beneficia a toda la costa por igual, quedando grandes extensiones de terreno con alto peligro y posiblemente sin rutas de evacuación. Se pudo corroborar que es muy probable que el tsunami de 1787 haya llegado incluso 6 km tierra adentro en algunas zonas del área de estudio, tal como describen los registros históricos.

Mediante el estudio en campo y por percepción remota, se generó nueva información en México sobre peligro de tsunamis. El trabajo refleja la magnitud del daño que podría provocar en un futuro, si un tsunami como el de 1787 penetrara la línea de costa. La falta de información a la población y de medidas preventivas podría ser la causa de daños considerables. Tal como se observó en el mapa de peligro, gran parte de las poblaciones se encuentran asentadas en áreas de alto peligro. Este trabajo es un insumo de primera importancia para los estudios de ordenamiento territorial, los cuales contemplan como parte integrante el análisis de riesgos y peligros naturales para la población. En este sentido, el trabajo aporta también a la gestión ambiental del área de estudio en particular.

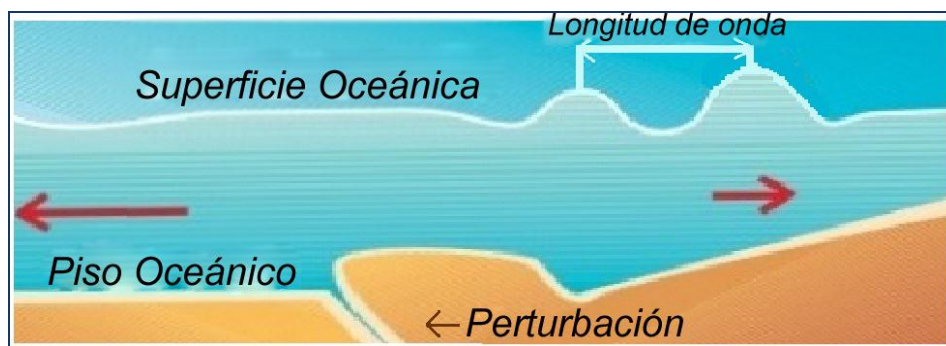
- **ANEXO 1 – Características de un tsunami**

Velocidad de un tsunami

La velocidad de onda de tsunami dependerá de la profundidad oceánica dada por $v = \sqrt{gd}$, donde v es la velocidad con la que se propaga la onda, g la aceleración de la gravedad (9.81 m/seg^2) y d la profundidad del fondo marino (UC, 2011), (Levin y Nosov, 2009). Para el Océano Atlántico la profundidad media es de 4 000 m, lo que da una velocidad de propagación promedio de 198 m/s o 713 km/h (la velocidad y la longitud de onda disminuye cuando las ondas se aproximan a aguas someras debido a que sufren el fenómeno de refracción (UC, 2011).

Longitud de onda

La longitud de la onda (L) de un tsunami corresponde al producto de la velocidad de propagación (V) y el período (T): $L = V \cdot T$... Para el caso de la velocidad media de en el océano pacífico (713 km/h) y un periodo de 15 minutos, tendremos una longitud de onda $L = 178 \text{ km}$ (UC, 2011).



Longitud de onda de un tsunami

Gracias a la gran medida de longitud de onda, el desplazamiento de un tsunami a grandes profundidades se manifiesta con amplitud de unos pocos centímetros en la

superficie (Figura 14). A diferencia de los tsunamis las olas comunes presentan un periodo de menos de 15 segundos, es esta característica lo que permite diferenciar claramente en un registro mareográfico y lanzar una alerta de tsunami (UC, 2011).

Run-Up

El Run-up del tsunami se produce cuando el pico de la onda se desplaza cerca de la zona costera. El Run-up es una medida de la altura máxima del nivel del agua cuando el tsunami entra en tierra firme en comparación con el nivel del mar (USGS, 2008).

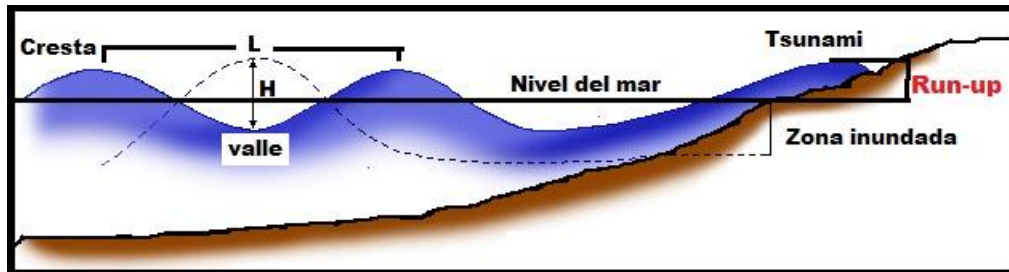


Figura n. Características de una onda provocada por tsunami (UC, 2011).

Las islas en grupo pueden generar una “sombra” a otras islas, reduciendo los efectos del tsunami. Las Islas pequeñas pueden experimentar un run-up con ondas de tsunami refractado ya que rodean a la isla (NOOA, 2000). A excepción de grandes tsunamis, la mayoría no dan lugar a olas gigantes. Después del run-up la energía del tsunami también se ve reflejada de vuelta al mar, generando modificaciones bruscas en la línea de costa (USGS, 2008).

Intensidad de un tsunami

Los tsunamis tienen una variación de potencial dentro de límites muy amplios que van desde ondas muy débiles que pueden ser registrados sólo con la ayuda de

instrumentos, hasta terribles catástrofes a lo largo de varios kilómetros sobre la costa (Levin y Nosov, 2009).

La primera clasificación de intensidad de los tsunamis la elaboró Sieberg en 1927. Propone seis grados de intensidad (muy ligero, ligero, fuerte, más fuerte, muy fuerte y desastroso). Esta escala se basa en la descripción de efectos en la costa y el grado de destrucción, y fue modificada posteriormente por Ambraseys en 1962 (Levin y Nosov, 2009).

Imamura-lida propusieron el concepto de magnitud de tsunami aplicando la siguiente fórmula (Levin y Nosov, 2009) :

$$m = \log_2 H_{max}$$

Donde H_{max} es la altura máxima de ola en metros, observado en la ribera o medido por un mareógrafo. Dicha escala es de seis puntos (de -1 a 4) (Levin y Nosov, 2009).

En un intento por mejorar la escala Imamura-lida, S.L. Soloviev en 1974 propone lo siguiente:

$$Intensidad = \frac{1}{2} + \log_2 H$$

Grado de intensidad del tsunami (m)	Altura de la onda (H) metros	Descripción de los daños
0	1-2	No produce daños.
1	2-5	Casas inundadas y botes destruidos son arrastrados.
2	5-10	Hombres, barcos y casas son barridas.
3	10-20	Daños extendidos a los largo de 400 km de la costa.
4	>30	Daños extendidos sobre más de 500 km a lo largo de la línea de costa.

Clasificación de intensidades de tsunami por Levin y Nosov, 2009

Donde H es la altura promedio del tsunami en la costa más cercana a la fuente. Actualmente, la intensidad es una definición ampliamente extendida y a la escala correspondiente se le denomina “Soloviev- Imamura intensity scale” (Levin y Nosov, 2009). Tanto la magnitud Imamura-lida como la escala de intensidad de Soloviev-Imamura, no es muy sensible a pequeños errores en la determinación de la altura de la ola. Sin embargo, permite una estimación de la altura de las olas en la costa y de la escala de destrucción (Levin y Nosov, 2009).

Actualmente existe una escala detallada de 12 niveles (Papadopoulos-Imamura, 2001), basada en las siguientes características:

- 1.- Su influencia sobre la gente
- 2.- El impacto en objetos naturales y artificiales, incluyendo botes.
- 3.- El daño causado a construcciones.

Esto sugiere que de acuerdo con esta escala, si un tsunami de gran amplitud llega a una costa con poca población, la intensidad será baja y de manera opuesta, un tsunami con amplitud media, pero que golpea en una zona con alta densidad poblacional, puede ser de alta intensidad.

- **ANEXO 2 – Geoformas de la zona costera**

Geoformas derivadas de procesos exógenos.

Procesos geológicos producidos generalmente por fuerzas externas de la Tierra, las cuales tiene origen en la superficie de la misma y en las capas superiores de la litosfera, principalmente por intemperismo, erosión y acumulación (Lugo, 1989).

1. *Playa*

Las playas son las geoformas costeras más importantes y ampliamente distribuidas (SNET, 2011). Una playa es la acumulación de sedimentos no consolidados, los cuales van desde arena muy fina hasta guijarros, cantos rodados, en algunas ocasiones rocas y en muchas otras con material de conchas. La franja de las playas representa alrededor del 40% de la costa del mundo (Bird, 2008).

Las playas se presentan en diferentes formas, algunas son largas y casi en línea recta. Sin embargo, existen algunas playas que van de curvadas a fuertemente curvadas como es el caso de las bahías, cada forma de la playa es importante al momento de la llegada de un tsunami, pues esto aumenta o no el peligro ante dicho fenómeno (Bird, 2008).

Las playas mantienen unos perfiles característicos cuyos detalles están determinados por el tamaño, forma y la composición del material de la playa, por la amplitud de la marea y por el tipo de propiedades de las olas que llegan (Huggett, 2007). A su vez, todas estas características y condiciones geológicas y de procesos físicos se dan según su localización (SNET, 2011).

2. Barra

Las barras costeras son formaciones alargadas y generalmente estrechas, de depósitos de material mar adentro. Su forma es casi lineal a un cuerpo de agua como bahías, generalmente compuesta de limo, arena o guijarros pequeños (Spellman, 2010).

3. Cordones litorales

Son subcadenas de arena, paralelas, conchas o rocas, que varían en amplitud desde unos pocos centímetros a varios metros. La distancia entre cadenas de arena también varía. La parte superior de una cadena de arena es llamada cresta, el número de crestas puede variar de un par hasta cientos. Entre cresta y cresta existen depresiones conocidas como surcos. Los cordones litorales representan antiguas líneas de costa, son una característica muy común en playas que se encuentran en construcción (Fairbridge, 1968).

4. Planicie costera

Su formación está dada por el levantamiento del fondo marino o el descenso del nivel del mar. Son superficies que se encuentran a lo largo del litoral marino, las cuales se extiende algunas veces con gran amplitud y generalmente presentan algún grado de inclinación hacia el mar.(Lugo, 1989)

5. Laguna

Cuerpo de agua salado que se encuentra en profundidades relativamente pequeñas, la cual se encuentra separada del mar profundo por bancos de arena o de coral, o alguna barrera similar (Spellman, 2010).

6. *Pantano de manglar*

Estos pantanos se forman en las depresiones costeras acumulativas tropicales, ocupadas por vegetación de manglar en suelos fangosos alimentados por aguas saladas marinas (Lugo, 1989). Contienen una gran cantidad de materia orgánica y sus sedimentos son más parecidos a la turba. Las raíces de los mangles facilitan la sedimentación y desarrollo del pantano (SNET, 2011).

7. *Marisma de Manglar*

Las marismas son elevaciones someras, con influencia de las mareas. Las marismas generalmente muestran vegetación, en zonas tropicales las marismas se muestran como pantanos de manglar (Lugo, 1989).

Los mangles son un tipo de sociedad de vegetales permanentemente verdes, tropicales, de tronco corto, que se desarrollan en depresiones de las costas marinas en la zona de mareas, pero protegidas del oleaje, en bahías, lagunas, etc. (Lugo, 1989).

8. *Marisma Salina*

Se refiere a una superficie en tierra firme pero con influencia de mareas privada en general de vegetación, constituida por arcillas, limos o arenas, originada por la desecación de un lago (Fairbridge, 1968; Lugo, 1989)

9. *Dunas*

Las dunas costeras son geoformas muy comunes a lo largo de las zonas costeras, se forman por acumulación de sedimentos que han sido transportados por el viento y depositados al borde de grandes lagos y mares (Huggett, 2007). Las dunas se encuentran en zonas donde están protegidas de la acción de las olas y corrientes, lo que permite la acumulación constante de sedimentos. La altura que pueden alcanzar es

de hasta 30 metros aproximadamente y pueden extenderse a lo largo de hasta 10 kilómetros (Huggett, 2007; SNET, 2011).

10. Estuarios o esteros

Los estuarios son cuerpos de agua semicerrados, con conexión al mar, pero también con la influencia de uno o varios arroyos o ríos que ahí desembocan (SNET, 2011; Spellman, 2010). Los estuarios están abastecidos tanto por agua dulce como por agua salada. Son lugares de depósito de sedimentos (SNET, 2011).

Los estuarios están influenciados en el exterior, es decir en su conexión con el mar por los procesos marinos, en la parte central por corrientes y mareas que chocan con las fluviales, sin embargo su energía es menor que en la zona externa. En cambio el interior de los estuarios está dominado por corrientes fluviales, fuera de cualquier influencia de mareas (SNET, 2011).

11. Planicie aluvial

Es una superficie amplia a manera de terraza acumulativa que está formada por la acumulación de sedimentos transportados por ríos (Lugo, 1989).

12. Terraza fluvial – planicie de inundación

Son plataformas topográficas en la ribera de los ríos que usualmente representan los niveles anteriores de valles o planicie de piso. Las terrazas pueden estar localizadas a una altura más o menos constante de la actual inundación (Fairbridge, 1968).

13. Meandro y meandro abandonado

El meandro se refiere a las flexiones formadas por un río más allá de su cauce, cuando un meandro se corta por un extremo, generando una hondonada seca, pantanosa e incluso con agua se le conoce como meandro abandonado.

14. Cauce de Río

Es una porción inferior de un valle fluvial ocupada por una corriente. Se caracteriza por su anchura, profundidad y la superficie de un río.

15. Planicie Ondulada

Superficie con alternancia de elevaciones suaves y depresiones de poca inclinación, ocupadas por valles poco profundos, es característica del pediplano (Fairbridge, 1968)

16. Banco de arena

Se refiere a arena de forma lineal y amplia en un cuerpo de agua, generalmente compuesta de arena, limo o guijarros pequeños (Spellman, 2010).

Geoformas derivadas de procesos endógenos.

Esencialmente se refiere a procesos geológicos producidos por fuerzas internas de la Tierra. Están controlados por la energía interna, por acción de la gravedad y por la rotación terrestre (Lugo, 1989)

1.-Lomeríos

Son pequeñas elevaciones que se presentan en la superficie terrestre (Fairbridge, 1968).

2.-Islas

Una isla es un cuerpo relativamente pequeño de tierra rodeada enteramente de agua (Fairbridge, 1968).

Estructuras antrópicas

1.- Espigones

Los espigones son una construcción que sobresale de la ribera, ya sea de un río o del mar y tiene diferentes finalidades. Puede utilizarse para abrir un paso de agua, defender las márgenes de la corriente o para modificar la corriente.

2.- Montículo de arena

Arena que extrajo para abrir un canal que une a la laguna con el mar, están ubicadas a las orillas del mismo.

• Bibliografía

Alcántara-Ayala, I. 2002. "Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries." *Geomorphology* **47**: 107-124.

Andrade, B., F. Arenas y M. Lagos 2010. "Incorporación de criterios de fragilidad ambiental y riesgo en la planificación territorial de la costa de Chile central." *Revista de Geografía Norte Grande* (45): 5-20.

Aronoff, S. 2005. *Remote sensing for GIS Managers*. ESRI press. Estados Unidos, 487pp.

Bergeron, L. 2011. "Unusual Earthquake Movement Triggered Japan's Massive Tsunami." Acceso: febrero, 2012, de <http://geology.com/press-release/japan-tsunami/>.

Bird, E. 2008. *Costal Geomorphology: An introduction*. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester, 411pp.

Corporación OSSO (Observatorio Sismológico del Suroccidente) 1997. *Simulaciones numéricas de propagación de tsunami para la costa Pacífica de Colombia*. Acceso: enero, 2012, de <http://www.osso.org.co/>,

Campbell, J. 2002. *Introduction to remote sensing*. The Guilford press. London, 621pp.

CENAPRED 2001. *Programa especial de prevención y mitigación de riesgo de nedastres 2001-2006*. Secretaria de gobernación, 135pp.

Cisternas, M., B. Atwater, F. Torrejón, Y. Sawai, G. Machuca, M. Lagos, A. Eipert, C. Youlton, I. Salgado, T. Kamataki y M. Shishikura 2005. "Prodecessors of the gaint 1960 Chile earthquake." *Nature* **437** (15): 404-407.

CONAPO (Consejo Nacional de Población) 2010. *Oaxaca: Grado de marginación por localidad según tamaño, 2010*. Acceso: marzo, 2012, de http://internet.coneval.gob.mx/Informes/Interactivo/interactivo_entidades.swf,

CONEVAL (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social) 2010. *Medición de pobreza 2010 por entidad federativa*. Acceso: marzo 2012, de http://internet.coneval.gob.mx/Informes/Interactivo/interactivo_entidades.swf,

Cumminis, P., L. Kong y K. Satake 2008. "Introduction to "Tsunami science four years after the 2004 Indian Ocean tsunami, part I: Modelling and hazard assessment"." *Pure and Applied Geophysics* **165** (11-12): 1983-1989.

Davidson-Arnott, R. 2010. *An Introduction to Costal Processes and Geomorphology*. Cambridge University. New York, 442pp.

De-By, R. A., Ed. 2001. *Principles of Geographic Information Systems*. The International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC). City.,

Dehays-Rocha, J. 2002. "Fenómenos Naturales, Concentración Urbana y Desastres en América Latina." *Perfiles Latinoamericanos* (20): 177-206.

Easterbrook, D. y D. Kovanen 1999. *Interpretation of landforms from topographic maps and Air photographs laboratory manual*. Prentice Hall, Upper Saddle River (New Jersey), 193pp.

Estrada, B. E. y J. F. Farbiarz 2005. "El terremoto y posterior tsunami del 26 de diciembre en Indonesia." *DYNA* **72** (145): 83-90.

Fairbridge, R. 1968. *The Encyclopedia of Geomorphology*. Reinholod book Corporation, New York, 1295pp.

Farreras, S. y A. Sánchez 1991. "The tsunami threat on the Mexican west coast: A historical analysis and recommendations for hazard mitigation." *Natural Hazards* (4): 301-316.

FEMA (Federal Emergency Management Agency) 2004. *Tsunamis*. Acceso: marzo, 2012, de <http://www.fema.gov/index.shtm>,

Ferrando, F. 2003. "En torno a los desastres "naturales". Tipología, conceptos y reflexiones." *Boletín del Instituto de la Vivienda* **18** (047): 15-31.

García-Mendoza, A., M. Ordóñez y M. Briones-Salas 2004. *Biodiversidad de Oaxaca*. UNAM, Instituto de Biología. México, D.F., 605pp.

Hart, D. y G. Knight 2009. "Geographic Information System Assessment of Tsunami " *Jurnal of Costal Research* **25** (1): 131-141.

Huggett, R. J. 2007. *Fundamentals of Geomorphology*. Routledge. New York, 466pp.

IFRC (Internationa Federation of Red Cross and Red Crescent Societies) 2005. *World Disasters Report* Kumarian press.246 pp.

INEGI 2011. *Escolaridad en Oaxaca*. Acceso, de <http://cuentame.inegi.gob.mx/monografias/informacion/oax/poblacion/educacion.aspx?tema=me&e=20>,

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) 2011. *Información por entidad*. Acceso: noviembre, 2011, de <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/oax/territorio/agua.aspx?tema=me&e=20>,

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) 2011. *Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Santiago Pinotepa Nacional*. Acceso: septiembre 2011, de <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/20/20482.pdf>,

INEGI (Instintuno Nacional de Estadística y Geografía) 2012. *Mapa digital de México V5.0*. Acceso: Marzo, 2012, de <http://gaia.inegi.org.mx/mdm5/viewer.html>,

Lagos, M. 2000. "Tsunamis de origen cercano a las costas de Chile." *Revista de Geografía Norte Grande* (27): 93-102.

Lagos, M. y M. Cisternas 2004. "Depósito de Tsunami como indicadores de riesgo: evidencias sedimentarias." *Revista Geográfica de Chile Tierra Australis* (49): 329-351.

Lagos, M. y D. Gutiérrez 2005. "Simulación del tsunami de 1960 en un estuario del Centro-Sur de Chile." *Revista de Geografía Norte Grande* (33): 5-18

Levin, B. y M. Nosov 2009. *Physic of Tsunamis*. Springer Science/Business Media, 327pp.

Lugo, J. 1989. *Diccionario Geomorfológico*. Instituto de Geografía, UNAM, D.F. 337 pp.

Lugo, J. y Inbar 2002. *Desastres Naturales en América Latina*. Fondo de Cultura Económica. México, D.F., 501pp.

NOOA-UNESCO, WDC y ITIC 2012. *Global Tsunami Sources 1650 B.C. to A.D. 2008 from Earthquake, Volcano, Landslide, and Other Causes*, UNESCO

NOOA (National Geophysical Data Center) 2000. *Tsunami Information*. Acceso: noviembre 2011, de <http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/results?t=102564&s=207&d=207#intro>,

- NOOA (National Oceanic and atmospheric Administration) 2002. *Tsunamis: Las grandes olas*. Acceso: noviembre 2011, de <http://itic.ioc-unesco.org/sp/library/pub>,
- NOOA center for Tsunami Research 2011. *Maximum Computed Tsunami Amplitudes around the Globe*. Acceso: noviembre 2011, de http://nctr.pmel.noaa.gov/indo20041226/Figure_1_sign.jpg,
- Núñez, F., M. Ortiz y J. Sánchez 2008. "The great 1787 Mexican tsunami." *Natural Hazards* **47** (3): 569-576.
- Patton, J. y L. Dengler. 2006. "Relative Tsunami Hazard Mapping for Humboldt and del Norte Counties, California." NOAA. de http://nctr.pmel.noaa.gov/tsu400/documents/Course_1_Day_2/Session_11/NCEE_patton_dengler.pdf.
- Rabinovich, A. y R. Thomson 2007. "The 26 December 2004 Sumatra Tsunami: Analysis of Tide Gauge Data from the World Ocean Part I. Indian Ocean and South Africa." *Pure and Applied Geophysics* (164): 261–308.
- Ritter, D., R. Craig y J. Miller 2002. *Process Geomorphology*. Mc Graw Hill. 560pp.
- Roy y Boyd 1996. *Quaternary geology of a tectonically stable, wave-dominated, IGCP Project 367*, Geological Survey of a New South Wales, Department of mineral, Sidney.
- Sabins, F. F. 1997. *Remote Sensing: Principles and Interpretation*. W.H. Freeman and Company. 494pp.
- Sánchez, A. 1993. *Catálogo de Tsunamis (Maremotos) en la costa Occidental de México*. United States Department Of Commerce. Boulder, Colorado, 80pp.
- Satake, k. y B. Atwater 2007. "Long- Term Perspectives on Giant Earthquake and Tsunamis at Subduction Zones." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **35**: 349-374.
- Sauter, F. 1989. *Fundamentos de Ingeniería sísmica. Tomo 1. Introducción a la sismología*. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 271pp.
- Servicio Mareográfico Nacional UNAM 2012. Acceso: marzo, 2012, de <http://www.mareografico.unam.mx/Mareografico/>,
- SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales) 2011. *Introducción a la Geología Costera*. Acceso: diciembre. 2011, de <http://www.snet.gob.sv/ver/oceanografia/seccion+educativa/geologia+costera/introduccion/>,
- Spellman, F. 2010. *Geography for nongeographers*. The scarecrow press. United Kingdom, 352pp.
- Servicio Sismológico Nacional 2012. *México: Zona de Alta Sismicidad*. Acceso: enero, 2012, de <http://secre.ssn.unam.mx/SSN/Doc/ICyT/8612/singh.htm>,
- Suárez, G. y P. Albin 2009. "Evidence for Great Tsunami Earthquakes (M 8.6) along the Mexican Subduction Zone." *Seismological Society of America* **99** (2A): 892-896.
- UC (Universidad Pontificia Católica de Chile) 2011. *Curso Geografía del mar*. Acceso: 2011, de http://www.uc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h713.html,
- UNDRO (United Nations Disaster Relief Organization) 1979. *Natural Disasters and Vulnerability Analysis in Report of Expert Group Meeting (9-17 July 1979)* Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator. Geneva.49 pp.
- UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) 2008. *Glosario de tsunamis* Intergovernmental Oceanographic Commission.40 pp.
- UNISDR (United Nations International Strategy for Disaster Reduction) 2009. *UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction* UNISDR. pp.

USGS (U.S. Geological Survey) 2008. *Tsunami and Earthquakes*. Acceso: noviembre, 2011, de <http://walrus.wr.usgs.gov/tsunami/basics.html>,

Wood, N. y J. Good 2004. "Vulnerability of port and harbour communities to earthquake and tsunami hazards: the use of GIS in community hazard planning." *Costal Management* **32**: 243-269.

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPIRITU”