



# Actualización del Atlas de Riesgos del Estado de Oaxaca en los Fenómenos Geológicos e Hidrometeorológicos

---

Presenta:  
**ERN, Ingenieros Consultores S.C.**

Para:  
**Instituto Estatal de Protección Civil**



México, D.F., octubre de 2010



## CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	4
1.1	Antecedentes .....	4
1.2	Atlas Estatal de Riesgos 2003.....	4
2.	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS PELIGROS A EVALUAR .....	8
2.1	Amenaza sísmica .....	8
	Definición .....	8
	Tectónica y sismicidad.....	8
	Tectónica de Placas .....	9
	Relación entre la tectónica de placas y la sismicidad mundial.....	11
	Actividad sísmica en México .....	13
2.2	Amenaza por tsunami .....	24
	Definición .....	24
	Descripción del fenómeno .....	25
	Parámetros de intensidad de los tsunamis.....	26
	Principales efectos.....	26
	Principales eventos ocurridos en México .....	28
2.3	Amenaza por marejada .....	30
	Definición .....	30
	Método de análisis .....	31
	Principales eventos ocurridos.....	33
3.	MODELO DE EVALUACIÓN DE LAS AMENAZAS .....	35
3.1	Amenaza sísmica .....	35
	Introducción .....	35
	Estimación de parámetros de movimiento fuerte.....	35
	Metodologías generales para el cálculo de amenaza.....	38
	Modelo analítico propuesto .....	40
	Cálculo de la amenaza sísmica.....	46
	Curvas de atenuación .....	50
	Estudios de microzonificación en Oaxaca .....	51
	Reporte de mediciones de vibraciones ambientales en la costa de Oaxaca. ....	59
	Resultados obtenidos .....	61
3.2	Amenaza por tsunami .....	64
	Introducción .....	64
	Hidrodinámica de los tsunamis .....	65
	Modelo analítico alternativos .....	68
	Generación .....	74
	Información usada en la modelación .....	74
	Parámetros del Modelo .....	75
	Mapas de Amenaza .....	76
3.3	Amenaza por marejada .....	77
	Modelo analítico propuesto .....	77
4.	EXPOSICIÓN DE INMUEBLES .....	80
4.1	Introducción .....	80
4.2	Vulnerabilidad estructural .....	80
4.3	Clasificación estructural .....	81



---

4.4	Actualización futura de bases de datos.....	87
5.	CREACIÓN DE LAS BASES DE DATOS DE ELEMENTOS EXPUESTOS.....	99
5.1	Introducción.....	99
5.2	Información considerada (vivienda) .....	99
5.3	Información obtenida del INEGI.....	100
5.4	Bases de datos obtenidas.....	101
5.5	Estadísticas de la información generada .....	103
6.	CÁLCULO PROBABILISTA DEL RIESGO .....	116
6.1	Introducción.....	116
6.2	Procedimiento para el análisis de riesgo .....	116
6.3	Ecuación básica .....	117
6.4	Incertidumbres.....	118
6.5	Estimadores puntuales del riesgo .....	118
6.6	Probabilidad de excedencia de valores de pérdida .....	119
6.7	Análisis de un solo escenario.....	119
7.	RESULTADOS OBTENIDOS .....	120
7.1	Sistema R-Atlas Oaxaca.....	120
7.2	Resultados a nivel municipio .....	122
8.	REFERENCIAS.....	130
	ANEXO A .....	132
	ANEXO B .....	136
	ANEXO C .....	140
	Glosario.....	140



## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Antecedentes**

El 15 de agosto del 2006, se publicó en el Diario Oficial de la Federación, el Acuerdo que establece las Reglas del Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (FOPREDEN), el cual tiene como finalidad proporcionar recursos tanto a las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal como a las entidades federativas, destinados a la realización de acciones y mecanismos tendientes a reducir riesgos, así como evitar o disminuir los efectos del impacto destructivo de los fenómenos naturales sobre la vida y bienes de la población, los servicios públicos y el medio ambiente.

Mediante oficio numero DEPC/DE/046, de fecha 12 de marzo del 2007, el Lic. Ulises Ernesto Ruiz Ortiz, Gobernador del Estado de Oaxaca, solicitó a la Coordinación General de Protección Civil, recursos con cargo al Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (FOPREDEN), con el objeto de realizar el proyecto preventivo denominado "ACTUALIZACION DEL ATLAS DE RIESGOS DEL ESTADO DE OAXACA EN LOS FENÓMENOS GEOLÓGICOS E HIDROMETEOROLÓGICOS".

Mediante la Sesión con fecha quince de febrero del presente año dos mil diez, el Comité de Adquisiciones, Arrendamientos y Servicios de Recursos Federales del Instituto Estatal de Protección Civil, tomó el Acuerdo número CAASRF/IEPC/002/10, en donde autoriza al Instituto Estatal de Protección Civil, contratar a la empresa ERN INGENIEROS CONSULTORES S.C., para la ejecución del proyecto preventivo denominado "ACTUALIZACIÓN DEL ATLAS DE RIESGOS DEL ESTADO DE OAXACA EN LOS FENÓMENOS GEOLÓGICOS E HIDROMETEOROLÓGICOS", para fortalecer y garantizar la seguridad de la población en medida de mitigación de riesgos, y en consecuencia, la del Estado.

Los fenómenos que se actualizarán en esta fase del Atlas son:

- 1) Sísmico
- 2) Tsunami
- 3) Marejada

### **1.2 Atlas Estatal de Riesgos 2003**

Oaxaca, debido a su ubicación geográfica, a sus condiciones climáticas y geológicas, así como a los problemas de asentamientos humanos en zonas de alto riesgo, es vulnerable a la presencia de fenómenos naturales. Algunos de estos fenómenos, por la magnitud y alcance de la región han provocado severos daños que requieren de una respuesta de la sociedad e institucional. Es por ello que se deben canalizar importantes recursos económicos para atender, en un primer momento, las situaciones de emergencia y, posteriormente, para resarcir los daños y restablecer las condiciones de normalidad social y económica en la región afectada. Por lo tanto, es imprescindible fortalecer e impulsar las acciones en la prevención de desastres y la correcta ocupación del territorio, a fin de disminuir la vulnerabilidad de los asentamientos humanos.

Para poder lograr lo anteriormente expuesto, es necesario contar con información suficiente sobre la distribución del riesgo en los diferentes asentamientos humanos a lo largo del estado y llevar a cabo una categorización del mismo, de tal manera que se puedan definir las



medidas adecuadas para la prevención, respuesta, recuperación y mitigación de los daños tanto físicos como sociales.

Un primer esfuerzo para llevar a cabo lo anterior, se hizo en el año 2003 al elaborar el Atlas Estatal de Riesgos, documento que intenta identificar los peligros geológicos (poniendo especial énfasis en el fenómeno sísmico), hidrometeorológicos y antropogénicos que afectan al estado y definir aquellas zonas que pudieran presentar mayores afectaciones ante la ocurrencia de los mismos. Para tal fin, el Gobierno del estado de Oaxaca convocó a dependencias y organismos federales y estatales a participar en dicho proyecto.

### **Descripción del Atlas Estatal de Riesgos de Oaxaca 2003**

El atlas de estatal de riesgo de Oaxaca se encuentra organizado en tres tomos para mayor facilidad en el manejo de la información por parte del lector. A continuación se presenta una breve descripción del contenido de cada uno de ellos.

#### *Tomo I*

El tomo I está fraccionado en 5 capítulos los cuales abordan distintos tipos de peligros y riesgos.

El capítulo uno, trata de los peligros de origen geológico relacionados con actividades tectónicas, donde éstas son la fuente de sismos y desencadenadoras de la reactivación de fallas geológicas o fracturas. En este capítulo también se abordan los agentes externos como la erosión y procesos gravitacionales como detonantes en la inestabilidad de laderas, deslizamientos y movimientos de masa rocosa.

En el capítulo 2 se encuentran los peligros por sistemas tropicales, frontales y masas de aire frío, los cuales por su origen se les llama hidrometeorológicos. La cartografía a nivel municipal muestra zonas de ocurrencia de estos fenómenos, así como tablas de susceptibilidad.

El capítulo 3 describe los peligros de origen químico, donde los incendios forestales son la base de una serie de subtemas en los que se definen conceptos, teorías, causas y efectos de los mismos. De igual modo, hace mención de las disposiciones legales, estadísticas y un mapa de susceptibilidad a incendio forestal nivel municipio.

El capítulo 4 maneja otros tipos de susceptibilidad de ocurrencia de eventos que pueden generar pérdidas con base en su origen, como el sanitario, el sociorganizativo y el químico de instalación industrial. Con origen de carácter sanitario se encuentra la contaminación ambiental, la desertificación y las epidemias. De origen sociorganizativo se agrupan ciertos actos resultantes de las actividades humanas como percances en cualquier tipo de transporte, interrupción de servicios vitales, comportamiento desordenado o antisocial, y accidentes industriales tecnológicos no asociados con productos químicos; ya que estos últimos se clasifican como origen químico de instalación industrial el cual se encuentra cartografiado a nivel municipio.

En el capítulo 5 se regionalizan los tipos de fenómenos que pueden causar pérdidas, tal es el caso de inundación, que se cartografía a nivel municipal. Además, se describen dos estudios, uno donde se propone una zonificación sísmica para la ciudad de Oaxaca de Juárez, que describe la instalación, monitoreo y resultados de las estaciones sísmicas; y en el otro

estudio se determinan coeficientes preliminares de diseño sísmico para la ciudad de Oaxaca y municipios conurbados.

### *Tomo II*

A diferencia del tomo anterior, éste es un tomo totalmente cartográfico, en donde los mapas, para la mejor representación de la información contenida, están a distintas escalas:

- La nacional se utiliza para el riesgo de huracanes, donde se representan las trayectorias de huracanes históricos que afectan al estado de Oaxaca.
- La estatal describe los peligros por procesos geomorfológicos de inestabilidad de laderas y niveles de erosión.
- La municipal representa susceptibilidad a inundaciones, incendios forestales, microsismos, heladas, tormentas eléctricas.

### *Tomo III*

El tomo III contiene fichas técnicas que cubren todo el estado de Oaxaca mediante una subdivisión basada en cartas topográficas y geológicas escala 1:250,000, las cuales son: Oaxaca, Chilpancingo, Minatitlán, Orizaba, Puerto Escondido, Salina Cruz, Zaachila.

Las fichas contienen la siguiente información:

- Datos generales: nombre y clave de la hoja, fecha, coordenadas, elevación y la referencia del lugar. Fotografías, rollo, descripción. Abundancia y tipo de vegetación. Suelo predominante, secundario y textura.
- Climas: Precipitación total anual, clima, temperatura media anual y humedad relativa del lugar.
- Geología: génesis del suelo, edad del suelo, litología, edad de la litología, formación, profundidad e intensidad del intemperismo químico y mecánico, inclinación, rumbo y tipo de estratificación, foliación, grado de fracturamiento, espaciamiento de fracturas, inclinación, rumbo y tipo de fallas, otras estructuras.
- Hidrología: región hidrológica, cuenca, subcuenca, densidad de drenaje, corriente, longitud y tipo de drenaje.
- Geomorfología. Control del relieve de acuerdo a actividad endógena y exógena predominante, etapa geomorfológica, forma de la pendiente y longitud.
- Deslizamientos. Tipo, longitud, compasividad, fragilidad y estabilidad de la masa, susceptibilidad al movimiento y área de afectación.

Desafortunadamente, si bien el Atlas de riesgos del estado de Oaxaca 2003, abarca una gran cantidad de fenómenos que afectan a la región, de acuerdo a los conceptos formales empleados para la estimación del riesgo, el trabajo desarrollado solamente identifica y plasma de una manera cualitativa, aquellas zonas donde se han presentado fenómenos naturales extraordinarios, o bien, aquellos lugares potencialmente generadores de éstos



(sismos, inundaciones, deslizamientos, etc.) sin llegar a presentar probabilidades de ocurrencia de dichos fenómenos y la intensidad de los mismos, y menos aún, sin estimar la intensidad el posible daño que los bienes expuestos pueden llegar a presentar, lo que limita la utilización de la información proporcionada para la creación de planes de prevención y mitigación de daños, así como la elaboración de planes de desarrollo urbano.

Es por eso que se crea este proyecto de investigación, el cual permitirá conocer el riesgo para cada uno de los municipios que forman al estado con base en la información disponible sobre los inmuebles expuestos y la infraestructura en general, tomando en cuenta las características estructurales que definen su comportamiento ante la acción de los fenómenos estudiados, y el costo de reconstrucción de cada uno de ellos, lo que determinará cuáles presentan mayor riesgo, además, permitirá canalizar recursos, en un futuro próximo, orientados hacia la disminución de los daños causados por los fenómenos naturales como son sismo, tsunami y marejada.

### **Conceptos fundamentales empleados**

A continuación se definen los conceptos fundamentales que se emplean en la "ACTUALIZACIÓN DEL ATLAS DE RIESGOS DEL ESTADO DE OAXACA EN LOS FENÓMENOS GEOLÓGICOS E HIDROMETEOROLÓGICOS" aceptados a nivel mundial por los investigadores y personas involucradas con los estudios de riesgos.

*Peligro:* Factor de riesgo externo de un sujeto o sistema, representado por un peligro latente asociado con un fenómeno físico de origen natural o tecnológico que puede presentarse en un sitio específico y en un tiempo determinado produciendo efectos adversos en las personas, los bienes y/o el medio ambiente, matemáticamente expresado como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un evento con una cierta intensidad en un cierto sitio y en cierto período de tiempo. Los fenómenos naturales presentan diversos tipos de peligro, por ejemplo la actividad volcánica, los terremotos, los tsunamis, los huracanes, ente otros.

*Vulnerabilidad:* Predisposición intrínseca de un sujeto o elemento a sufrir daño debido a posibles acciones externas, y por lo tanto su evaluación contribuye en forma fundamental al conocimiento del riesgo mediante interacciones del elemento susceptible con el ambiente peligroso.

*Riesgo:* Resultado de la convolución de peligro y vulnerabilidad de los elementos expuestos a tales amenazas. El riesgo está relacionado con la probabilidad de que se manifiesten ciertas consecuencias, las cuales están íntimamente relacionadas no sólo con el grado de exposición de los elementos sometidos sino con la vulnerabilidad que tienen dichos elementos a ser afectados por el evento.

*Incertidumbre:* En la ciencia hay ciertas reglas que se desarrollaron para evitar especulaciones o malas maniobras. Evaluar pérdidas futuras es algo incierto, razón por la cual ha sido usual que se recurra a alguna técnica probabilística, en algunos casos determinando un límite de pérdida y la probabilidad de que esta sea igualada o sobrepasada. Un ejemplo puede ser la probabilidad de que el costo de los daños y reparaciones en un sitio sobrepase una cifra, digamos de un millón de dólares, como consecuencia de por lo menos un suceso en los próximos cincuenta años.

## 2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS PELIGROS A EVALUAR

### 2.1 Amenaza sísmica

#### Definición

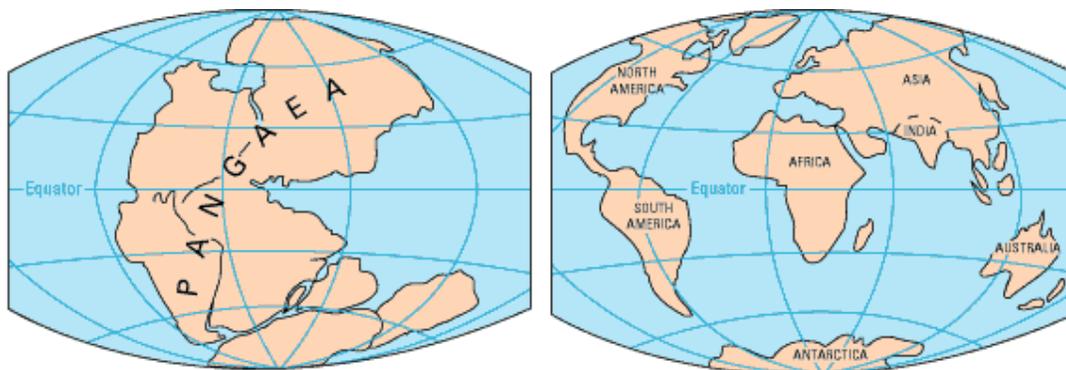
Los sismos se definen como un proceso paulatino, progresivo y constante de liberación súbita de energía mecánica debido a los cambios en el estado de esfuerzos, de las deformaciones y de los desplazamientos resultantes, regidos además por la resistencia de los materiales rocosos de la corteza terrestre, bien sea en zonas de interacción de placas tectónicas como dentro de ellas. Su efecto inmediato es la transmisión de esa energía mecánica liberada mediante vibración del terreno aledaño al foco y de su difusión posterior mediante ondas de diversos tipos, a través de la corteza y a veces del manto y el núcleo terrestre.

La mayor parte de los riesgos naturales se pueden detectar antes de que se presenten. Los sismos ocurren sin previo aviso, produciendo grandes impactos psicológicos sobre la población, lo que los hace aún más peligrosos; estos pueden ocasionar invaluable pérdidas humanas y gigantescas pérdidas económicas en cuestión de segundos. Las pérdidas económicas suman tanto las directamente producidas por el daño como las pérdidas consecuenciales debidas a la falta de operación en los días subsecuentes al evento.

La amenaza sísmica de una región determinada depende de un gran número de variables, algunas de las cuales son difíciles de cuantificar en la actualidad, sin embargo, se han desarrollado modelos simplificados que permiten estimar las variables fundamentales involucradas en el cálculo de la amenaza sísmica, lo cual permite dar un tratamiento científico al problema.

#### Tectónica y sismicidad

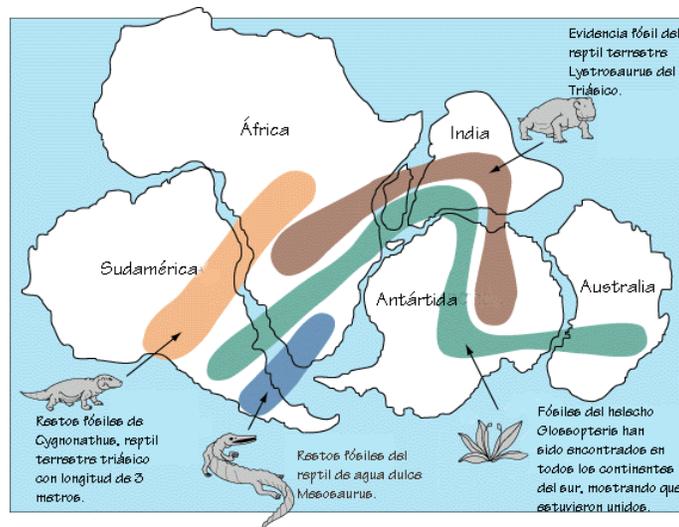
Alfred Wegener (1912) planteó que grandes zonas de la corteza terrestre denominadas placas tectónicas estaban en continuo movimiento, y que los continentes se habían formado a partir de uno único llamado Pangea (Figura 2.1).



**Figura 2.1.** Evolución de los continentes a partir de Pangea (Pangaea).

Según la teoría de la deriva continental, el supercontinente Pangea comenzó a romperse hace más de 200 millones de años, dividiéndose en un número de placas cada vez mayor, mismas que se desplazaron dando lugar a la configuración de los continentes que hoy conocemos.

La teoría de Wegener se basó en el ajuste notable de los continentes sudamericanos y africanos. Wegener también fue cautivado por la coincidencia de estructuras geológicas inusuales y de los fósiles de plantas y de animales encontrados en las líneas de la costa de Sudamérica y de África, que ahora son separadas por el extenso Océano Atlántico. Él razonó que era físicamente imposible para la mayoría de estos organismos haber nadado o haber sido transportados a través de los grandes océanos. Para él, la presencia de la especie fósil idéntica a lo largo de las partes costeras de África y Sudamérica era la evidencia que obligaba a pensar que los dos continentes estuvieron una vez ensamblados (Figura 2.2).



**Figura 2.2.** Evidencias fósiles de la existencia del supercontinente Pangea.

La teoría de la deriva continental se convirtió en la chispa que encendió una nueva manera de ver la tierra. Pero cuando fue propuesta por Wegener, la comunidad científica no aceptó que los continentes y los océanos estuvieran en constante movimiento. Su teoría no fue bien recibida, aunque admitían las evidencias científicas disponibles.

Una debilidad en la teoría de Wegener era que no podía contestar satisfactoriamente a la pregunta fundamental planteada por sus críticos: ¿Qué clase de fuerzas podían ser suficientemente grandes para mover tales inmensas masas de roca sólida a tan grandes distancias? Hoy en día no se cuenta con una respuesta precisa a esta pregunta.

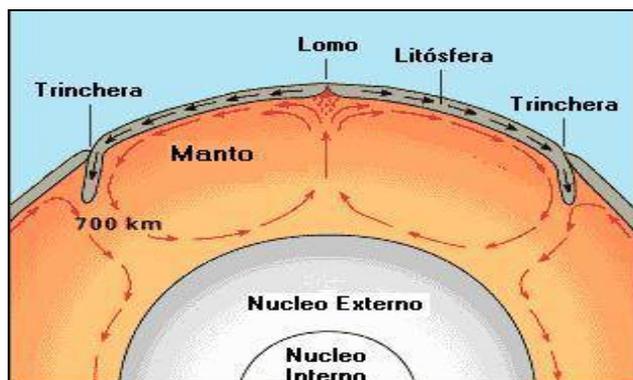
### **Tectónica de Placas**

La tectónica de placas es tan importante para la geología como el descubrimiento de la estructura del átomo para la física y la química, y la teoría de la evolución para las ciencias de la vida.

Aunque esta teoría es validada extensamente por la comunidad científica, los aspectos que explican el movimiento de las placas se siguen discutiendo hoy en día. Los científicos aún tratan de explicar cómo la tectónica de placas pudo haber funcionado antes a la formación de

Pangea y si los procesos similares funcionan, o han funcionado siempre, en otros planetas en nuestra Sistema Solar.

Algunos científicos asocian los movimientos de las placas con la energía calorífica que se concentra bajo la litósfera. En la Figura 2.3 se indica el esquema general de la dinámica tectónica relacionada con los movimientos de convección de las capas inferiores, que se encuentran en estado viscoso debido al calor.



**Figura 2.3.** Flujo convectivo que provoca el movimiento de las placas.

La roca caliente en estado líquido sale hacia la superficie. La parte superior del manto se enfría hasta enrudecer para formar la corteza terrestre. Debido al movimiento de placas la roca se incrusta de nuevo hacia el centro de la tierra donde se recalienta y emerge otra vez. Este ciclo se repite para generar lo que llaman los científicos un flujo convectivo.

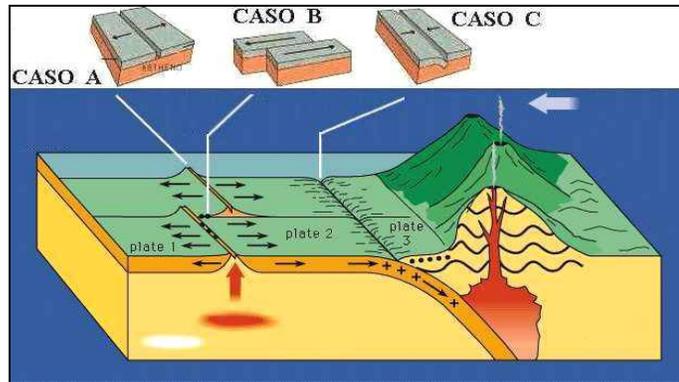
Este movimiento hace que las placas tengan contacto, deslizamiento o alejamiento. Los tipos de interacción entre las placas son los siguientes:

**Extrusión:** Este fenómeno ocurre cuando se separan dos placas tectónicas. Figura 2.4, caso a.

**Deslizamiento:** Se produce cuando entran en contacto dos placas que tienen movimiento paralelo a la falla, estas placas se mueven en direcciones opuestas como se ilustra en la Figura 2.4, caso b.

**Subducción:** Esto ocurre cuando dos placas de similar espesor entran en contacto entre sí originando el hundimiento de una placa por debajo de la otra. Esto se ilustra en el Figura 2.4, caso c.

En las zonas de extrusión aparece "nueva corteza" mientras en las zonas de subducción las placas que penetran por debajo se funden por efecto del calor en el interior de la tierra. Así se origina el ciclo que mantienen en continuo reciclaje a la corteza terrestre (Figura 2.4). Se puede observar cómo los volcanes activos se sitúan frecuentemente en zonas de subducción.



**Figura 2.4.** Tipos de interacción entre placas.

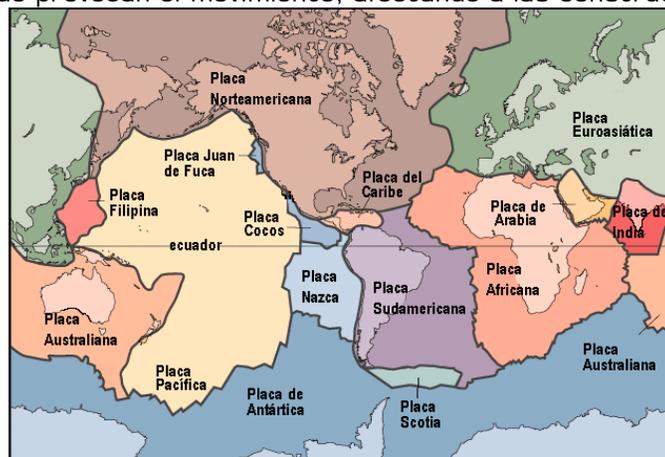
Los temblores son, sólo uno de los tantos efectos producidos por el movimiento de las placas. La interacción entre ellas genera volcanes, depósitos minerales, cordilleras montañosas y trincheras expandiendo o acortando los océanos.

### **Relación entre la tectónica de placas y la sismicidad mundial**

La litosfera está dividida en varias placas, cuyo desplazamiento alcanza velocidades promedio del orden de algunos centímetros por año. En los límites entre estas placas se generan fuerzas de fricción que producen grandes esfuerzos en la roca.

Cuando dichos esfuerzos sobrepasan la resistencia del material, o cuando se vencen las fuerzas de fricción, se produce una ruptura violenta y la liberación repentina de la energía acumulada mejor conocida como sismo o terremoto. Aunque la velocidad promedio de movimiento de las placas es menor a 10 centímetros por año, el movimiento de las mismas durante un sismo puede ser de algunos metros.

En la Figura 2.5 se muestran las doce grandes placas en las que se divide la corteza terrestre. La energía es irradiada desde el foco o hipocentro en forma de ondas que se propagan en todas direcciones a través de la Tierra. Estas ondas son conocidas como ondas sísmicas y son las que provocan el movimiento, afectando a las construcciones.



**Figura 2.5.** Placas que forman la litósfera.

Durante el siglo XX se presentaron sismos de elevada intensidad en cada una de las décadas que han causado daños materiales considerables y pérdidas humanas. Se citan a continuación los de mayor intensidad y que han causado mayor número de víctimas fatales (Tabla 2.1) alrededor del mundo.

**Tabla 2.1.** Sismos históricos

FECHA	REGION	MAG.	# DE PÉRDIDAS HUMANAS
1531, 26 enero	Lisboa, Portugal	S/R	30 000
1556, 23 enero	Shensi, China	S/R	830 000
1667, noviembre	Shemakha, Azerbaijón	S/R	80 000
1668, 17 agosto*	Anatolia, Turquía	S/R	8 000
1693, 11 enero	Catania, Italia	S/R	60 000
1737, 11 octubre	Calcutta, India	S/R	30 000
1755, 7 junio	Norte de Persia	S/R	40 000
1755, 1 noviembre	Lisboa, Portugal	S/R	70 000
1780, 28 febrero*	Irán	S/R	200 000
1783, 4 febrero	Calabria, Italia	S/R	50 000
1797, 4 febrero	Quito, Ecuador	S/R	40 000
1822, 5 septiembre	Aleppo, Siria	S/R	22 000
1828, 18 diciembre	Echigo, Japón	S/R	30 000
1857, 16 diciembre*	Napoles, Italia	S/R	11 000
1868, 13 agosto	Perú y Bolivia	S/R	25 000
1868, 16 agosto	Ecuador y Colombia	S/R	70 000
1891, 28 octubre*	Mino-Owari, Japón	S/R	7 273
1896, 15 junio	Riku-Ugo, Japón	S/R	22 000
1906, 17 agosto*	Valparaiso, Chile	8.2	20 000
1908, 28 diciembre	Mesina, Italia	7.5	120 000
1915, 13 enero	Avezzano, Italia	7.0	30 000
1920, 16 diciembre	Kansu, China	8.5	180 000
1923, 1 septiembre	Kwato, Japón	8.2	143 000
1927, 22 mayo*	Tsinghai, China	7.9	200 000
1932, 26 diciembre	Kansu, China	7.6	70 000
1934, 15 enero*	Bihar, India	8.1	10 700
1935, 31 mayo	Quetta, Pakistán	7.5	60 000
1939, 24 enero	Chillán, Chile	7.7	30 000
1939, 27 diciembre	Erzincan, Turquía	8.0	23 000
1960, 29 febrero	Agadir, Marruecos	5.9	14 000
1960, 22 mayo*	Chile	9.5	5 700
1962, 1 septiembre	Irán	7.3	14 000
1968, 31 agosto	Irán	7.4	11 600
1970, 31 mayo	Yungay, Perú	7.8	66 000
1972, 23 diciembre	Managua, Nicaragua	6.2	5 000
1972, 10 abril**	Fars, Irán	7.1	5 000
1974, 28 diciembre**	Pakistán	6.3	5 300
1975, 4 febrero*	Haicheng, China	7.0	10 000
1976, 4 febrero	Guatemala	7.9	22 000-23 000
1976, 30 junio**	Irian occ., Indonesia	7.1	5 000
1976, 27 julio	Tang-Shan, China	7.6	655 000
1976, 16 agosto	Mindanao, Filipinas	7.9	5 000-8 000
1976, 24 noviembre	Irán	7.3	5 000
1978, 16 septiembre**	Tabas, Irán	7.8	25 000
1980, 12 octubre	El Asbam, Argelia	7.3	5 000
1985, 19 septiembre	Ciudad de México	8.1	6 000
1987, 5 marzo**	Ecuador	7.0	5 000
1988, 7 diciembre*	Spitak, Armenia	6.8	25 000
1990, 21 junio**	Gilan, Irán	7.7	50 000
1993, 29 septiembre*	Latur-Killari, India	6.2	9 748
1994, 17 enero	Northridge, California	6.7	60
1995, 16 enero*	Kobe, Japón	6.9	5 502
1999, 17 agosto*	Izmit, Turquía	7.6	15 637
2001, 26 enero*	Gujarat, India	7.7	20 085
2003, 21 mayo*	Algeria	6.8	2 266
2003, 26 diciembre*	Sureste Iran	6.6	31 000
2005, 8 octubre*	Pakistan	7.6	86 000
2006, 26 mayo*	Java, Indonesia	6.3	5 749
2007, 15 agosto*	Chincha Alta, Peru	8.0	514
2008, 12 mayo*	Sichuan, China	7.9	87 652
2010, 12 enero*	Haití	7.0	220 000
2010, 27 febrero*	Maule, Chile	8.8	710

Fuentes de la Revista de Geografía Universal Vol.20 No.5, Nov, 1985

\* Datos de la página <http://neic.usgs.gov/> de la U.S. Geological Survey (USGS)

\*\* Revista Sigma de Swiss Re No. 1/2002

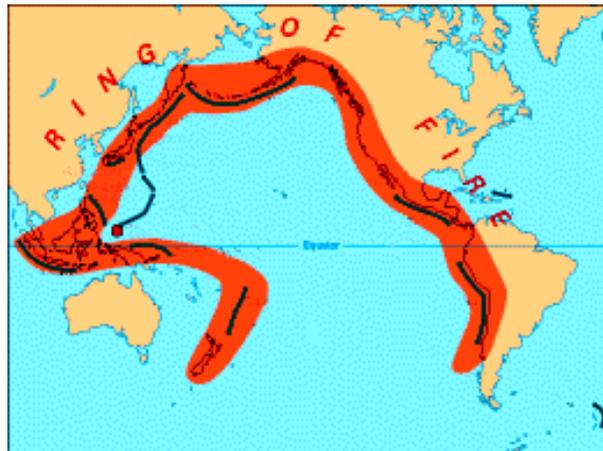
Como se puede observar en la Tabla 2.1, en el año de 1556 ocurrió un gran terremoto en la parte central de China, que cobró aproximadamente 830 mil vidas humanas. Por muchos años se creyó que los efectos que produjo este terremoto no se repetirían, sin embargo, en 1976 otro terremoto, también en China, en la provincia de Tang-Shan, dejó un saldo de 655 mil muertos. En ese mismo año, temblores en Guatemala, Nueva Guinea, Turquía, Italia y las Islas Filipinas cobraron, adicionalmente, otras 40 mil vidas, dejaron miles de heridos, una gran parte de la población quedó sin hogar y se registraron cuantiosas pérdidas materiales.

### **Cinturón Circumpacífico**

Las principales zonas sísmicas del mundo coinciden con los contornos de las placas tectónicas y con la posición de los volcanes activos de la Tierra. Esto es porque la causa de los terremotos y de las erupciones volcánicas está fuertemente correlacionada con el proceso tectónico del planeta.

La mayor parte de los sismos ocurren en zonas específicas, delineando franjas muy estrechas. Así, la colisión de las Placas Africana y Europea genera los temblores del norte de Italia, este del Mediterráneo e Irán. La interacción de la Placa de Cocos y Americana es responsable de los temblores de la costa suroeste de México. Similarmente puede explicarse la actividad sísmica de Japón, California, Alaska y otras regiones.

El cinturón Circumpacífico delimita la zona con mayor actividad sísmica en el mundo. En la Figura 2.6 se muestra este cinturón. En los últimos trescientos años se ha registrado gran cantidad de información sobre los efectos de los terremotos originados en este cinturón. Los otros dos principales cinturones sísmicos del mundo son: el cinturón Transasiático, que pasa por el Himalaya, Irán, Turquía, Mar Mediterráneo, sur de España y otros países y el cinturón situado en el centro del Océano Atlántico.

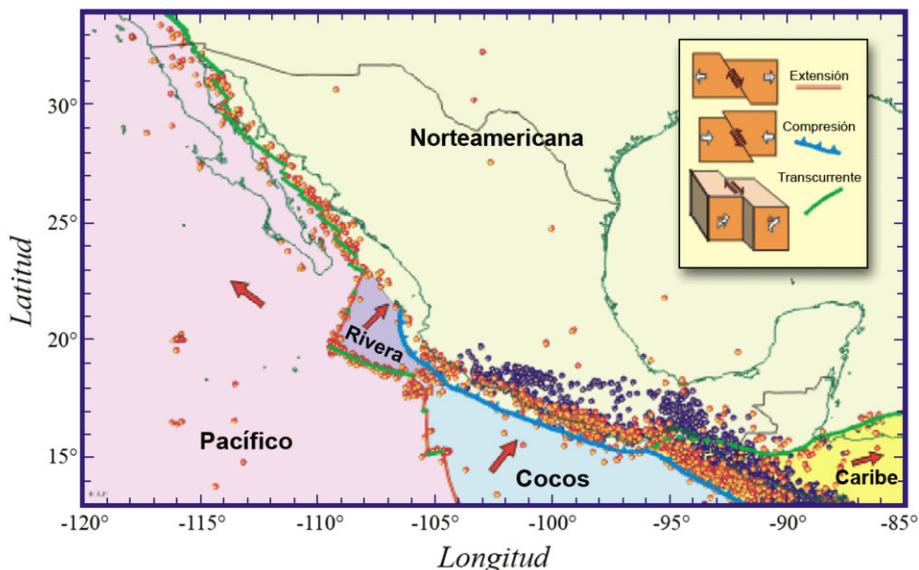


**Figura 2.6.** Cinturón Circumpacífico (Ring of Fire).

### **Actividad sísmica en México**

México es uno de los países del mundo con mayor actividad sísmica. Según estadísticas, se registran más de 90 sismos por año con magnitud superior a 4 grados en la escala de Richter, lo que equivale a un 6% de todos los movimientos telúricos que se registran en el mundo. En él se libera aproximadamente el 3 por ciento de la energía sísmica mundial, lo cual se traduce en la presencia de por lo menos un sismo mayor a 7 grados Richter cada año.

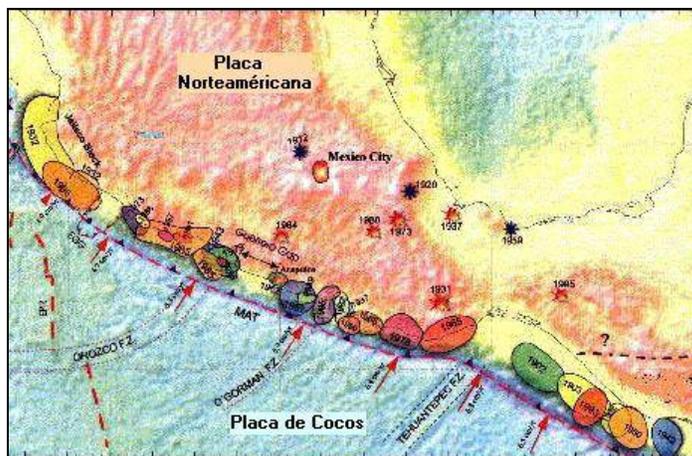
Nuestro país se encuentra dentro del Cinturón Circumpacífico, la región con mayor sismicidad a nivel mundial. Es por ello, que desde el sur de Sinaloa hasta el oeste de Chiapas ocurren numerosos sismos, debido al choque entre las placas oceánicas de Cocos y Rivera contra la placa continental de Norteamérica. La placa de Norteamérica contiene la mayor parte del territorio nacional y en el norte del país choca con la placa del Pacífico ocasionando los sismos entre los estados de Baja California y Sonora en la zona de deslizamiento de la falla de San Andrés.



**Figura 2.7.** Actividad sísmica en la República Mexicana.

La principal actividad sísmica de México se encuentra en la zona de subducción en las costas del Océano Pacífico, en ella se ubica el estado de Oaxaca; por lo que es necesario prestarle importancia a los eventos sísmicos y los efectos que estos producen así como las pérdidas que se pueden presentar en la región por esta causa.

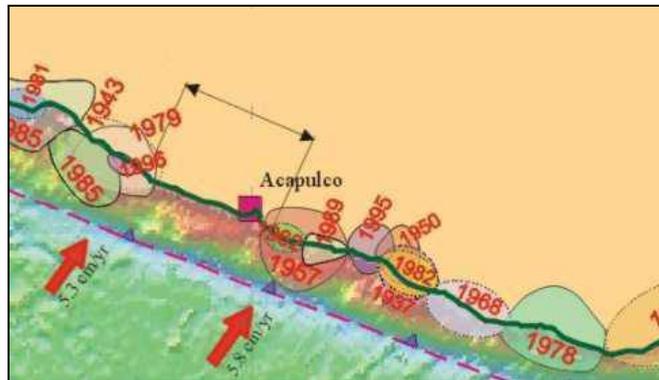
En la Figura 2.8 se muestra esta zona de subducción con algunos epicentros y zonas de ruptura de sismos recientes.



**Figura 2.8.** Zona de subducción.

### *La brecha sísmica de Guerrero*

Una de las brechas sísmicas con mayor potencial en México y que puede producir unos o varios sismos grandes en un futuro cercano es la de la Costa de Guerrero. En su porción noroeste (Zihutanejo-Acapulco) se han originado grandes sismos en 1899, 1907, 1908, 1909, y 1911, y no han ocurrido temblores importantes en los últimos 80 años. En la porción sureste de esta brecha (desde Acapulco hasta Oaxaca) no se han verificado eventos de importancia después de los terremotos de 1957 y 1962. Esta brecha se ilustra en la Figura 2.9.



**Figura 2.9.** Brecha de Guerrero.

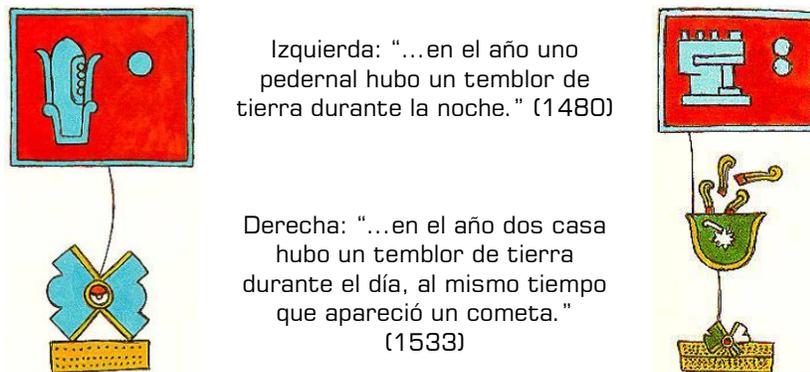
La magnitud del sismo que se puede presentar, de acuerdo al tamaño de la brecha de Guerrero, puede ser superior a 8.0, aunque existe la posibilidad que en lugar de un solo sismo se presenten varios de menor magnitud en un periodo relativamente corto. Es importante entender y estudiar esta brecha debido a las implicaciones que los efectos de la ocurrencia de un sismo en esta zona puede generar en las regiones de la costa y la mixteca oaxaqueña.

### **Cronología de los sismos en México**

A continuación se presenta una breve reseña cronológica de los principales sismos que se han sentido en el valle de México desde la época prehispánica. Se incluyen algunos comentarios de las fuentes originales, la interpretación del tipo de sismo y posible origen. En algunos de los más importantes se muestran el mapa de isosistas o curvas de igual intensidad en la escala de Mercalli.

#### *Época prehispánica*

Para los aztecas los temblores no eran desconocidos, como lo demuestran algunos códices (Figura 2.10), los cuales se han utilizado como fuente de información de sismos históricos.



**Figura 2.10.** Códices prehispánicos.

1475 (9 caña)

*"Hubo por entonces fortísimos temblores de tierra, tan frecuentes y repetidos que los cerros se desgajaron en pedazos, las casas quedaron aplastadas".*

Sismo de tipo local con epicentro probable dentro o muy cerca de la ciudad de México.

Principios de la colonia

En la época de la colonia, la descripción de los temblores la llevaron a cabo principalmente los frailes como Clavijero y Sahagún. Posteriormente, con el uso generalizado de la imprenta, se reportaban datos sismológicos en los periódicos de la época, con descripciones algunas veces exageradas aunque pintorescas.

1611; Agosto

*"... fue muy notable, se sintió cerca de las tres de la mañana, en la ciudad y su comarca tan reciamente que los viejos no recordaban ni habían oído hablar de otro semejante. Hizo mayores estragos fuera de la ciudad aunque en ella cayeron edificios religiosos y murieron personas bajo lo derruido. Treinta horas después, tembló la tierra más de 40 veces, cosa insólita más explicable después de un fuerte terremoto".*

1653; 17 de enero

*"...tembló de oriente a poniente con tan grave y repentina fuerza, que se temió una grande ruina en esta ciudad, duró más del tiempo que se puede ocupar en rezar dos credos con devoción, cayóse la tercera parte de la cerca de la huerta de Santo Domingo de esta ciudad y otros lienzos de paredes de diferentes casas. Hizo muchos daños fuera de la ciudad principalmente en la Amilpas y en Azcapotzalco derribó la mitad de la iglesia".*

1665; 20 de enero

*"...a las tres de la mañana reventó con gran estrépito un cerro del que comenzó a salir fuego hasta llegar a cubrirlo de llamas de fuego y estando encendido, hizo un extraño movimiento de tierra..."*

Sismo sentido en la Ciudad de México, causado por la erupción del Popocatepetl.

*1711; 16 de agosto*

*"Se sintió un terremoto en la noche en México tan fuerte que sonaron las campanas; los edificios padecieron mucho. Las crónicas del tiempo dicen duró temblando media hora". "...donde fueron mayores [los estragos del terremoto] es en la región mixteca: allí la mayor parte de las torres y bóvedas de los templos se cayeron al suelo, y entre éstos las del pueblo de Tonalá en Huajuapán, cuyo convento y casas se desplomaron".*

Tal vez se trate de un sismo profundo en el interior de la placa de Cocos.

*Finales de la colonia*

Con el desarrollo de la Colonia como centro de cultura, los temblores fueron descritos también por naturalistas a la vez que por publicistas y público en general, pues en todos los folletos antiguos se encuentran notas sobre temblores sentidos en varios sitios al mismo tiempo, a medida que las comunicaciones entre los pueblos se establecían.

*1787; 28 de marzo*

*"...hubo un temblor de tierra que duró cinco minutos, y el resto del día y de la noche, repitió como diez veces, se quebrantaron algunas partes del Palacio, el Cañon de la Diputación y otras varias casas".*

Se informa de un enorme maremoto en la Barra de Alotengo, Oaxaca y Acapulco, lo que hace pensar que fue de subducción de excepcional magnitud (más de 8.5 grados).

*1845; 7 de abril*

México, D.F. *"...siguieron luego violentas oscilaciones de norte a sur, tan marcadas que las torres de la Catedral se veían oscilar. La conmoción fue terrible y el espanto de los habitantes grandísimo, que aumentó más cuando se escuchó el estruendo de las cúpulas del templo de Santa Teresa que se derrumbó".*

Derribó la cúpula de la iglesia del Señor de Santa Teresa y el Hospital de San Lázaro. Daños en el Palacio Nacional, la Cámara de Senadores, la Universidad y varios edificios más. Se reporta gran destrucción en Xochimilco y daños en Tlalpan.

Huamuxtitlán, Gro. *"...comenzó el sacudimiento y dentro de algunos instantes ya no existía la mayor parte de los edificios; la torre cayó con todas sus campanas...", "La fuerza del temblor fue tal que no podían estar en pie ni las gentes ni los animales; el agua del río se levantaba y volaba, y la tierra parecía hervir..."*

Acapulco, Gro. *"...comenzó al principio con ligeros movimientos, que fueron aumentando en intensidad hasta llegar a ser muy fuertes, media hora después sobrevino una fuerte oleada en el mar que penetró en la costa como cincuenta varas...", "quedó varado el bote del resguardo..."*

Gran sismo de subducción en las costas de Guerrero, en todo este estado se reportó destrucción y daños graves en la mayoría de las construcciones. Además se reportaron daños en iglesias y construcciones viejas en Michoacán, Guadalajara, Morelos y Puebla, también se sintió fuertemente en Oaxaca, Veracruz y el Estado de México y menos intenso en Colima, Hidalgo, San Luis Potosí, Guanajuato y Querétaro (Figura 2.11).



**Figura 2.11.** Sismo del 7 de abril de 1845.

*1858; 19 de junio*

México, D.F. *“Las oscilaciones fueron tan fuertes que se veían mover las torres de la catedral, los árboles de los paseos parecían agitados por el viento, y las fuentes quedaron casi vacías. La totalidad de las casas padecieron y muchos de los edificios también sufrieron bastante...”.*

Daños en Palacio, en la Casa del Ayuntamiento, en el Teatro Principal y en las iglesias de Santo Domingo, Sagrario, San Francisco, Jesús Nazareno, entre otras. Se abrieron grietas en las calles y se levantaron las banquetas.

Morelia, Mich. *“Entre los edificios no quedó uno sano, y muchos vinieron a tierra con gran estrépito, y con mucha consternación por parte de los habitantes, que jamás habían visto cosa semejante”*

Estado de Michoacán. *“...el terremoto se sintió en casi todo él; pero en donde se hizo sentir más el fenómeno fue en Pátzcuaro, donde el sacudimiento causó terribles efectos, arruinando varios templos y casas, y causando varias desgracias personales. En los pueblos de Charo, Indaparapeo y otros cayeron muchas casas. Sintióse igualmente en Ario, Tacámbaro, Uruapan, Apatzingán, Los Reyes y otros muchos lugares.”*

Estado de México. *“El terremoto se sintió en Toluca, Tenango, Tenancingo y Temascalcingo; en esta población las oscilaciones fueron tan violentas que los grandes órganos de algunas cercas se troncaban a consecuencia de este terremoto. Sufrieron mucho el campanario y la bóveda de la iglesia. También se sintió en Temoaya, San Pedro y en otros muchos lugares...”*

Gran sismo de profundidad intermedia con epicentro en el estado de Michoacán. También se sintió con gran intensidad en Jalisco, Querétaro, Guanajuato y Guerrero, fue menos intenso en Puebla, San Luis Potosí, Veracruz y Colima (Figura 2.12).



**Figura 2.12.** Sismo del 19 de junio de 1858.

1864; 3 de octubre

México, D.F. "...su duración se estimó en un minuto. No causó muchas desgracias personales ni grandes averías en los edificios, aunque si se produjeron en éstos algunas cuarteaduras y sobre todo en los acueductos".

Daños en muchas cañerías de la ciudad y en los arcos de Belén. Cuarteaduras de algunos edificios.

Orizaba, Ver. "...se ha dejado sentir en esta ciudad uno de los más fuertes y alarmantes, causando la muerte de algunas personas y maltratando considerablemente varios templos y casas"

Puebla, Pue. "...se sintió en esta ciudad un temblor de tierra tan fuerte, que no se tiene memoria de otro igual; varios edificios públicos han quedado deteriorados y algunos amenazando ruina, lo mismo que muchos particulares."

Tlaxcala, Tlax. "En las inmediaciones casi todos los templos han padecido, y las casas los mismo, habiéndose inhabitables ya entre ellas."

Un sismo profundo con epicentro en Orizaba, Veracruz. También se registraron daños en **construcciones viejas en Oaxaca**, Guerrero y Morelos (Figura 2.13).



**Figura 2.13.** Sismo del 3 de octubre de 1864.

1882; 19 de julio

México, D.F. "...sintióse un fuerte temblor de dos minutos y medio de duración. Las aguas de las fuentes se salieron, las campanas de muchas iglesias replicaron, se produjeron cuarteaduras en el Palacio Nacional y en el de Diputación, así como en el Sagrario, y en algunos otros daños y derrumbes que tampoco me parecen haber sido muy grandes..."

**Oaxaca, "...se sintió en Oaxaca y pueblos del estado un fuerte y espantoso terremoto que puso en gran alarma a todos sus habitantes, en Oaxaca cuarteó muchas casas en la parte baja de la población. En Huajuapán de León destruyó todos los edificios de azotea; más de 800 familias quedaron en la miseria, pues las casas que no se desplomaron, quedaron amenazando ruina..."**

Puebla, Pue. "La alarma fue general y grande: muchas casas han quedado bastante deterioradas, y algunas amenazando próxima ruina."

Probablemente de un sismo profundo con epicentro en Huajuapán de León, Oaxaca. Se sintió con gran intensidad en los estados de Tlaxcala y Morelos (Figura 2.14).



**Figura 2.14.** Sismo del 19 de julio de 1882.

1885; 19 y 20 de septiembre

Gran destrucción en el centro de la ciudad de México y en las colonias Doctores, Guerrero, Tepito, Morelos, Roma, Juárez, Merced y Tlatelolco, entre otras. Destruyó casi 2,000 edificios, levantó el pavimento y rompió las redes de tuberías en varias partes de la ciudad. Derrumbó muchas casas en Ciudad Guzmán y causó daños a edificios en Ixtapa, Zihuatanejo y Lázaro Cárdenas (Figura 2.15).



**Figura 2.15.** Sismo del 19 de septiembre de 1985.

Así mismo, en México han ocurrido grandes sismos que han generado un número importante de pérdidas humanas, éstos se describen en la Tabla 2.2

**Tabla 2.2.** Sismos que han cobrado mayor número de víctimas en México.

<b>EVENTO</b>	<b>MUERTOS</b>	<b>DAÑOS DIRECTOS</b>	<b>DAÑOS INDIRECTOS</b>	<b>TOTAL DAÑOS</b>
Sismo en México 1912	202	n.d	n.d	n.d
Sismo en Puebla y Veracruz 1920	430	n.d	n.d	n.d
Sismo en Jalisco 1932	300	n.d	n.d	n.d
Sismo en Estado de Guerrero 1957	28	n.d	n.d	n.d
Sismo en Guerrero 1964	40	n.d	n.d	n.d
<b>Sismo en Oaxaca 1973</b>	<b>527</b>	<b>n.d</b>	<b>n.d</b>	<b>n.d</b>
Sismo en la Ciudad de México 1985	6,000	3,589.0	515.0	4,104.0
Sismo en Guerrero y Oaxaca 1995	n.d.	21.1		21.1
Sismo en Puebla y Oaxaca 1999	15	139.9	11.2	151.1
<b>Sismo en Oaxaca 1999</b>	<b>35</b>	<b>153.6</b>	<b>1.4</b>	<b>155.0</b>

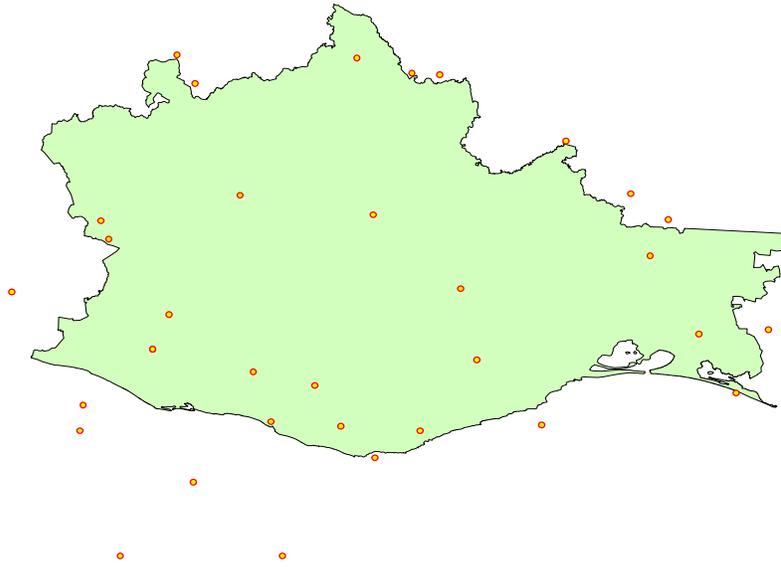
Pérdidas en millones de dólares  
 n.d. - no disponible.

Ahora bien, los sismos que han afectado de manera considerable al estado de Oaxaca se presentan en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3.** Sismos de gran magnitud que han afectado al estado de Oaxaca.

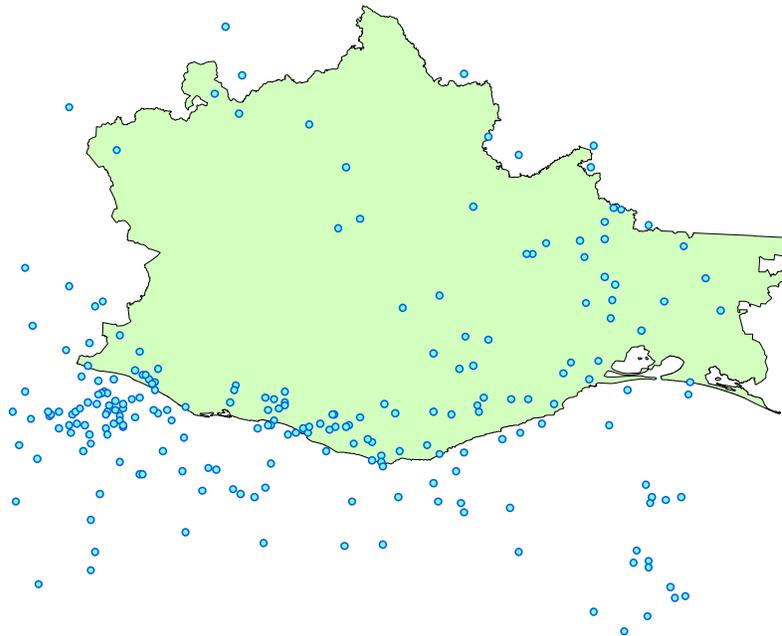
EVENTO	FECHA	LAT.	LONG.	MAG.	ZONA
1	03/02/1911	15.00	98.00	8.3	Costa de Oaxaca
2	27/03/1911	18.20	96.20	7.3	Veracruz-Oaxaca
3	02/06/1916	16.77	95.90	7	Oaxaca
4	29/12/1917	17.40	94.85	7	Istmo de Tehuantepec
5	29/12/1917	15.00	97.00	7.1	Costa de Oaxaca
6	22/03/1928	15.83	96.15	7.7	Costa de Oaxaca
7	17/04/1928	17.26	96.44	7.7	Oaxaca
8	17/06/1928	16.22	97.18	8	Oaxaca
9	04/08/1928	16.37	97.80	7.4	Oaxaca
10	09/10/1928	16.37	97.80	7.8	Oaxaca
11	15/01/1931	16.13	96.80	8	Oaxaca
12	16/01/1931			7	Costa de Oaxaca
13	05/06/1935			7	Oaxaca
14	26/07/1937	18.19	96.03	7.2	Veracruz-Oaxaca
15	23/12/1937	17.10	98.07	7.7	Guerrero-Oaxaca
16	02/01/1938			7.2	Costa de Oaxaca
17	20/11/1942	16.47	94.43	7.2	Istmo de Tehuantepec
18	25/11/1942			7.2	Costa de Oaxaca
19	11/10/1945	18.32	97.65	7.1	Oaxaca
20	07/06/1946	16.50	94.00	7.1	Istmo de Tehuantepec
21	11/07/1946	17.23	94.62	7.1	Istmo de Tehuantepec
22	11/08/1948	17.75	-95.25	7	Oaxaca
23	14/12/1950	17.22	98.12	7.3	Guerrero-Oaxaca
24	09/07/1951			6.2	Oaxaca
25	23/08/1965	16.30	95.80	7.8	Oaxaca
26	22/08/1968	16.60	97.70	7.4	Oaxaca
27	28/08/1973	18.30	96.54	7.3	Veracruz-Oaxaca
28	29/11/1978	15.86	96.64	7.8	Costa de Oaxaca
29	22/06/1979	16.99	94.73	6.5	Istmo de Tehuantepec
30	24/04/1983	15.87	95.40	6.7	Golfo de Tehuantepec
31	13/07/1986	16.08	94.20	6	Istmo de Tehuantepec
32	15/07/1987	17.39	97.26	6	Oaxaca
33	14/09/1995	16.75	-98.67	7	Costa de Oaxaca
34	25/02/1996	15.83	98.25	6.9	Costa de Oaxaca
35	19/03/1996	15.49	97.55	6	Costa de Oaxaca
36	19/07/1997	16.00	98.23	6.3	Costa de Oaxaca
37	02/02/1998	15.65	96.43	6.4	Costa de Oaxaca
38	15/06/1999	18.13	-97.54	7	Huajuapán
39	30/09/1999	15.89	-97.07	7.4	Costa de Oaxaca

Para dar una mejor idea de la ubicación de los epicentros donde se generaron los eventos anteriores, en la Figura 2.16 se muestran su distribución geográfica.



**Figura 2.16.** Ubicación de epicentros de sismos con magnitud mayor o igual que 6.5.

Como se puede observar en la figura anterior, la actividad sísmica en el estado de Oaxaca es considerable. Esto se puede apreciar de una mejor manera si se representa en un sistema de información geográfica sismos de menor intensidad, los cuales ocurren con mayor frecuencia. En la Figura 2.17 se puede observar la ubicación de los epicentros de sismos con magnitudes mayores o igual que 4.5 en la escala de Richter.



**Figura 2.17.** Ubicación de epicentros de sismos con magnitud mayor o igual que 4.5.

## 2.2 Amenaza por tsunami

### Definición

Se conoce como tsunami a la onda gravitacional generada en el océano cuando un fenómeno detonante desplaza verticalmente una gran masa de agua. La gran mayoría de los tsunamis son de origen tectónico y se generan cuando se presenta un movimiento vertical del fondo marino ocasionado por un sismo de gran magnitud cuya profundidad sea menor que 60 km (Figura 2.18). Otras causas menos frecuentes de tsunamis son las erupciones de volcanes submarinos, impacto de meteoritos o deslizamientos de tierra bajo el mar.



**Figura 2.18.** Tsunami generado por el movimiento vertical de una falla en el fondo del océano.

Un sismo que suceda en zonas de interacción tectónica o fallamiento interoceánico induce el desplazamiento vertical de una gran masa de agua, el cual induce la generación de una onda que toma las características de un tsunami al desplazarse por el océano y llegar a la costa. En mar abierto es muy difícil o imposible detectar un tsunami, dado que la altura de la ola es generalmente inferior a un metro. Sin embargo, al llegar a la costa, la disminución en la profundidad del lecho oceánico, levanta la lámina de agua, generando una pared de agua que se adentra varios kilómetros en el continente. La energía de un tsunami, y en consecuencia su intensidad y capacidad destructiva, depende de la altura de la ola y su velocidad de impacto al entrar en la costa.

Los tsunamis se diferencian principalmente a partir del mecanismo detonante que los genera. Se conocen como tsunamis tectónicos a los generados a partir de sismos. Cualquier otro tipo de tsunami no lleva este nombre, y no se cuenta con un término científico común o particular para describirlos. Estos se refieren a tsunamis generados por deslizamientos, actividad volcánica (lahares) o incluso eventos aún más aislados y de baja probabilidad de ocurrencia como impactos de meteoritos.

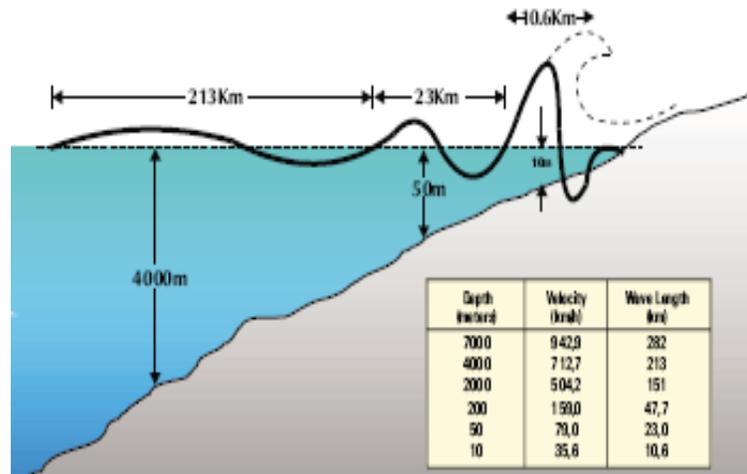
Los tsunamis se clasifican en locales, si el lugar de arribo es cercano o dentro de la zona de generación o a menos de una hora de tiempo de viaje desde su origen, en regionales, cuando el litoral invadido está a menos de 1000 km de distancia de la zona de generación o a pocas horas de tiempo de viaje desde esa zona, y lejanos, si el lugar de arribo está a más de 1000 km y a, aproximadamente, medio día o más de tiempo de viaje desde esa zona. En este trabajo se considerarán únicamente como relevantes los tsunamis tectónicos que puedan generarse por la actividad sísmica en las costas del Pacífico oaxaqueño.

Los tsunamis son un riesgo para la vida y las propiedades de todos los residentes costeros que viven cerca del océano. Durante la década de los 90, más de 4,000 personas perecieron a causa de 10 tsunamis y los daños a la propiedad fueron cercanos a mil millones de dólares.

La principal causa de la destructividad de un tsunami se atribuye sobre todo a la progresiva tendencia de las sociedades a instalarse cerca de la costa y a la falta de un sistema de alerta como el que existe en el Océano Pacífico.

### Descripción del fenómeno

Un tsunami o maremoto es una onda en el mar, generada por el desplazamiento vertical del fondo marino. Esta onda viaja a grandes velocidades en el océano (800 km/h) perdiendo su configuración al llegar a las costas lo que provoca marejadas y olas en ocasiones mayores a las provocadas por los fenómenos hidrometeorológicos (Figura 2.19). Mientras se desplazan por aguas profundas, la ondas de los tsunamis son de gran longitud (cientos de kilómetros) y muy pequeña altura (centímetros). Por ello, son indetectables desde embarcaciones y aviones, y solo pueden ser medidas con mareógrafos que desafortunadamente no existen en el Océano Índico (sí existen, por ejemplo, en el Pacífico).



**Figura 2.19.** Esquema de la configuración de un tsunami en el trayecto a la costa.

La primera ola que llega a la costa no suele ser la más alta y puede pasar desapercibida por parecerse a las normales; luego se produce un importante descenso del nivel del mar (Figura 2.20) seguido de una ola de mayor tamaño (en ocasiones mucho mayor) seguida de otras en intervalos de 15 a 60 minutos.



**Figura 2.20.** Foto satelital que muestra el estado normal de la playa en la costa de Kalurata (Sri Lanka) y el descenso del mar presentado el 26 de diciembre de 2004.

Cualquier océano puede experimentar un tsunami aunque es más frecuente que ocurran en el Océano Pacífico donde está localizado el "Anillo de Fuego". En esta zona los gobiernos y pobladores están mejor preparados y en algunos países cuentan con sistemas de alerta contra estos fenómenos.

### Parámetros de intensidad de los tsunamis

La manera de definir qué tan grande es un evento tsunamigénico, en términos de la energía asociada en su generación y propagación, así como en los niveles de impacto que el tsunami es capaz de generar, se basa en escalas de intensidad y magnitud definidas principalmente por medios empíricos. La intensidad califica los niveles de impacto o de potencial destructivo del tsunami, mientras que la magnitud provee información acerca de la energía involucrada en su desarrollo.

A lo largo de la historia se han propuesto diferentes escalas de intensidad y magnitud, en función de la cantidad de información disponible en el momento de su publicación, relacionada con la comprensión física del tsunami y de sus efectos. La Tabla 2.4 presenta un resumen de las principales escalas de intensidad y magnitud existentes para la caracterización del tsunami.

**Tabla 2.4.** Escalas de intensidad y magnitud de tsunami.

Autor	Año	Descripción
<b>Escalas de Intensidad</b>		
Sieberg	1927	Intensidad subjetiva. Escala de 6 niveles
Ambraseys	1962	Intensidad subjetiva. Escala de 6 niveles
Shuto	1991	Intensidad subjetiva. Escala de 6 niveles
Papadopoulos & Imamura	2001	Intensidad subjetiva. Escala de 12 niveles
Imamura -lida	1960's	Medida de intensidad basada en registros de altura de ola
Hatori	1979	Escala Imamura-lida modificada. Incluido el efecto de la distancia al epicentro
Soloviev	1970	Medida de intensidad basada en registros de altura de ola. Equivalente a Imamura-lida
<b>Escalas de Magnitud</b>		
Abe	1979 - 1981	Escala comúnmente aceptada. Caracterización de tsunami transpacíficos y regionales
Murty - Loomis	1980	-

### Principales efectos

Los desastres derivados de la ocurrencia de un tsunami son relativamente raros en comparación con otras amenazas naturales. Sin embargo, se ha visto a lo largo de la historia su alta capacidad destructiva sobre todo ante la alta vulnerabilidad de ciertas regiones costeras. Es por esto que el eventual riesgo por tsunami en una zona de condiciones y características óptimas para su generación y arribo es importante y no debe ser desestimado. Tragedias como la del gran tsunami de Indonesia, donde alrededor de 225,000 personas perdieron la vida, son pruebas fehacientes del gran poder destructivo de estos eventos. Los principales efectos derivados de la ocurrencia de un tsunami, y que están

directamente asociados con las pérdidas económicas y de vidas humanas, se enuncian a continuación.

### *Inundación*

La incursión de grandes cantidades de agua en el continente, como consecuencia del arribo de ondas tsunamigénicas a una región costera, implica la inundación de vastas áreas litorales. Es de esperarse que muchas de las pérdidas se presenten no por el embate directo de las olas sobre la infraestructura y la población, sino por la inundación constante impulsada por una fuerte corriente de agua marina tierra-adentro. La Figura 2.21 muestra el alcance de la inundación presentada en la provincia japonesa de Onogawa tras la ocurrencia del tsunami de Chile de 1960. Se puede observar la rápida incursión del agua dentro de las zonas residenciales.



4:40 am. Llegada de la corriente marina a la zona.



4:45 am. Rápida extensión de la inundación.



4:50 am. Inundación en su máximo nivel.



7:30 am. Retroceso de aguas.

**Figura 2.21.** Inundación generada por tsunami. Onogawa, Japón. Tsunami de Chile de 1960. (Fuente: Atwater et. al., *Surviving a Tsunami—Lessons from Chile, Hawaii, and Japan.*, USGS Circular 1187., 2005).

### *Daño estructural*

El embate de las olas de tsunami sobre componentes de infraestructura de cualquier tipo, así como las inundaciones posteriores, puede generar daños estructurales importantes. Las poderosas olas pueden literalmente arrasar con construcciones y edificaciones que encuentren a su paso. Estos daños están directamente asociados con las pérdidas inducidas por el tsunami. El costo de reparación o demolición de viviendas afectadas, reubicación de familias, recolección de escombros, y labores humanitarias de identificación y recuperación de víctimas, son algunos ejemplos de las actividades que deben desarrollarse una vez termine

el evento. La Figura 2.22 presenta algunos ejemplos del potencial destructivo de los tsunamis, y permite hacerse una idea de la extensión del desastre que desencadenan.



Daños generados en Hilo, Hawaii



Daños generados en la provincia de Maullín, Chile



Extensión de inundación y daños en la provincia de Queule, Chile.

**Figura 2.22.** Ejemplos de afectación generada por el tsunami de Chile de 1960.  
(Fuente: Atwater et. al., *Surviving a Tsunami—Lessons from Chile, Hawaii, and Japan.*, USGS Circular 1187., 2005).

### Principales eventos ocurridos en México

Las estadísticas de maremotos ocurridos en la costa occidental de la República Mexicana son poco precisas, ya que excepto algunos lugares, por ejemplo Acapulco, antes del siglo XIX esta región tuvo muy escasa población. La operación de la red de mareógrafos comenzó a funcionar hasta 1952. La siguiente tabla muestra los tsunamis de origen local observados o registrados en México posteriores a 1925 (CENAPRED y Pavón, 1998, Sánchez y Farreras, 1993). Se muestran en negritas los sitios donde los tsunamis afectaron costas oaxaqueñas.

**Tabla 2.5.** Principales tsunamis ocurridos en territorio mexicano.

Año	Mes	Día	Lat.	Lon.	Zona del sismo	Mag. del sismo	Lugar de registro del tsunami	Altura máxima de olas (m)
1537								
1732	2	25			Acapulco, Guerrero		Acapulco	4
1754	9	1			Acapulco, Guerrero		Acapulco	5
1787	3	28			San Marcos, Guerrero	8.00	Acapulco <b>Pochutla</b> <b>Tehuantepec</b>	4 - -
1787	4	3			Costa de Oaxaca		<b>Pochutla</b> <b>Juquila</b>	4 4
1820	5	4	17.20	99.60	San Marcos, Guerrero	7.60	Acapulco	2
1833	3	10			Acapulco, Guerrero		Acapulco	-
1834	3	11			Acapulco, Guerrero		Acapulco	-
1845	4	7	16.60	99.20	Acapulco, Guerrero	7.90	Acapulco	-
1852	12	4			Acapulco, Guerrero		Acapulco	-
1870	5	11			Costa de Oaxaca	7.90	<b>Puerto Angel</b>	-
1875	2	23			Manzanillo, Colima		Manzanillo	-
1907	4	14	16.60	99.20	San Marcos, Guerrero	8.00	Acapulco	2
1909	7	30	16.80	99.80	Costa de Guerrero	7.40	Acapulco	-
1925	11	16	18.50	107.00	Zihuatanejo, Guerrero	7.00	Zihuatanejo	7
1928	3	22	15.67	96.10	Costa de Oaxaca	7.70	<b>Puerto Angel</b>	-
1928	6	16	16.33	96.70	Costa de Oaxaca	7.80	<b>Puerto Angel</b> <b>Chacahua</b> <b>Huatulco</b>	- - -
1932	6	3	19.50	104.25	Costa de Colima y Jalisco	8.20	Manzanillo Cuyutlán Barra de Navidad San Blas	3 - - -
1932	6	18	19.50	103.50	Costa de Colima	7.80	Manzanillo	1
1932	6	22	19.00	104.50	Costa de Colima	7.70	Cuyutlán Manzanillo Tecomán	10 - -
1932	6	29						-
1948	12	3	22.00	106.50	Islas Mariás	6.90	Isla María Madre	2 - 5
1950	12	14	17.20	98.10	Oaxaca y Guerrero	7.30	Acapulco	0.3
1957	7	28	16.50	99.10	San Marcos, Guerrero	7.90	Acapulco <b>Salina Cruz</b>	- -
1962	5	11	17.25	99.60	Acapulco, Guerrero	7.00	Acapulco	0.54 - 0.81
1962	5	19	17.10	99.60	Acapulco, Guerrero	7.20	Acapulco	0.27 - 0.34
1965	8	23	16.30	95.80	Costa de Oaxaca	7.30	Acapulco	0.4
1973	1	30	18.40	103.20	Colima	7.50	Acapulco Manzanillo <b>Salina Cruz</b> La Paz Mazatlán	- 0.3 - 1.13 - - -
1978	11	29	16.00	96.80	Pinotepa Nacional, Oaxaca	7.80	<b>Puerto Escondido</b>	1.5
1979	3	14	17.30	101.30	Guerrero	7.60	Acapulco Manzanillo	0.21 - 1.31 0.1 - 0.42
1981	10	25	17.75	102.25	Michoacán	7.30	Acapulco	0.09
1985	9	19	18.14	102.71	Michoacán	8.10	Lázaro Cárdenas	2.5



							Playa Azul	-
							Ixtapa-Zihuatanejo	3
							Acapulco	0.53 - 1.15
							Manzanillo	-
1985	9	21	17.62	101.82	Michoacán	7.50	Acapulco	0.43 - 1.2
1995	10	9			Colima - Jalisco	8	Manzanillo	2
							Barra de Navidad	5.1
							Melaque	4.5
							Cuastecomate	4.4
							La Manzanilla	0.4
							Boca de Iguanas	5.1
							El Tecuán	3.8
							Punta Careyes	3.5
							Chamela	3.2
							San Mateo	4.9
							Pérula	3.4
							Chalacatepec	2.9

A lo largo de la historia sísmica de Oaxaca se han presentado sismos con las características apropiadas para generar tsunamis, ya que los casos históricos permiten establecer que, en general, se requieren sismos de subducción con magnitud mayor a 7 para detonar un tsunami.

## 2.3 Amenaza por marejada

### Definición

Una marejada se puede definir como una formación de olas en la superficie del mar con una longitud de onda considerablemente grande respecto a su altura. Las marejadas se generan a partir del movimiento de las corrientes marinas y de su calentamiento, todo esto a una distancia relativamente lejana, lo que ocasiona un importante desplazamiento de agua hacia las costas del Pacífico mexicano, afectando principalmente al estado de Oaxaca. Esta misma distancia permite que las olas que forman la marejada sean más estables y limpias según avanzan hacia la costa, Figura 2.23.

Otra acción generatriz es habitualmente la acción del viento sobre la superficie del agua generando olas que tienen una ritmicidad que usualmente es de 20 segundos y como máximo suelen propagarse unos 150 metros tierra adentro, de hecho, la propagación está limitada por la distancia, de modo que va perdiendo intensidad al alejarse del lugar donde el viento la está generando.



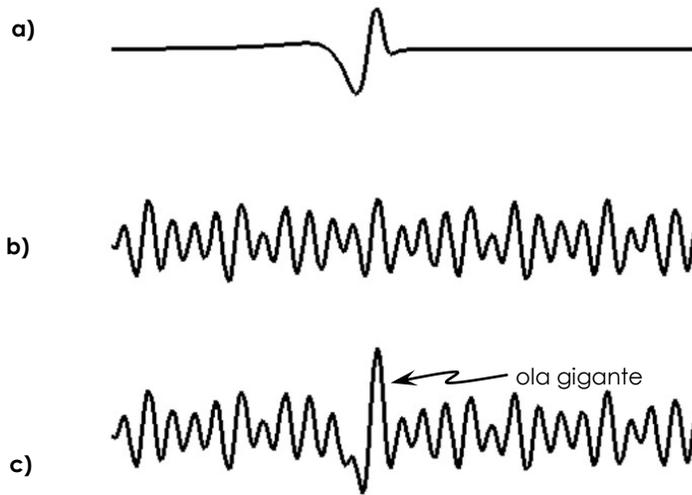
**Figura 2.23.** Ejemplos de marejada o mar de fondo.

Una característica importante para definir una marejada es el tamaño de las olas que se están generando pues con esta información se puede definir el tamaño de la marejada, el cual es, generalmente, la altura promedio del 33 % de las olas más grandes que se presentan en un rango de tiempo determinado; la distancia medida comprende desde la cresta de la ola, hasta el valle que se presenta en dos olas consecutivas. La dimensión de una marejada también se conoce como la altura significativa de olas de dicha marejada. La altura significativa de olas al cubo es un parámetro importante para estimar la energía de erosión con la que una ola llegará a la costa.

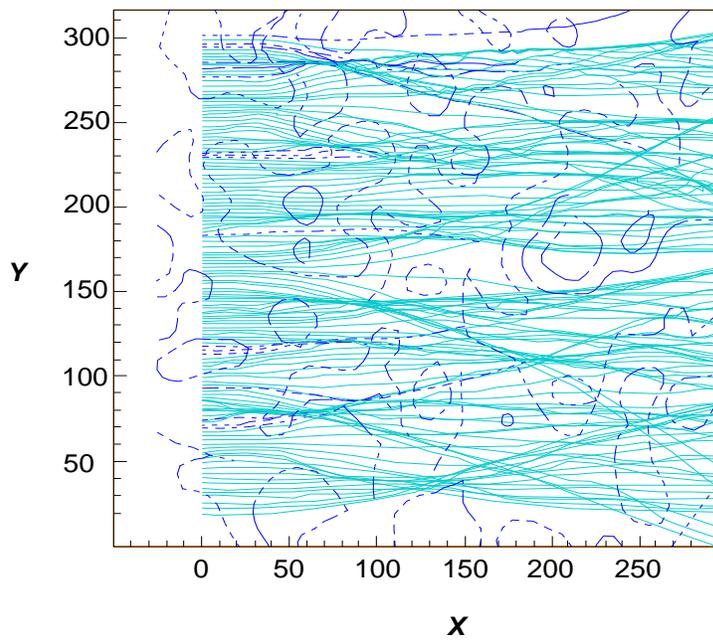
En principio, este fenómeno puede pasar inadvertido debido a que la altura de las olas "es sensiblemente igual y su perfil tiende hacia la forma sinusoidal", además de que puede presentarse aún en excelentes condiciones climatológicas.

### **Método de análisis**

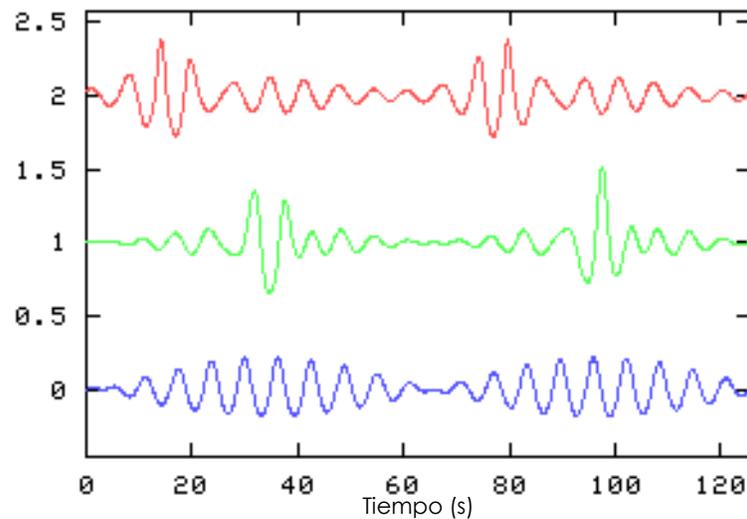
La energía de las olas puede converger hacia regiones determinadas por lo que la probabilidad de encontrar olas grandes es mucho mayor en estas zonas que en otras. Este tipo de refracción y difracción de las olas puede ser calculado, tanto si son provocadas por corrientes como por la batimetría. Por tanto, se pueden predecir de alguna manera, olas de este tipo. Estudios en el tema han mostrado que un tren de olas en su conjunto es levemente no lineal y tiene una anchura de banda relativamente pequeña. Esto justifica el uso de ecuaciones no lineales de Schrödinger como modelos matemáticos simplificados para la descripción de estas olas, para ellos, se tiene que tomar en cuenta los tres principales efectos físicos que pueden causar una concentración o convergencia de la energía en mar abierto, causa principal de la generación de marejadas; estos efectos son: (1) Convergencia en tiempo y espacio (figura 2.24). (2) Convergencia por corrientes (figura 2.25). (3) Convergencia no lineal (figura 2.25). Los dos primeros se pueden describir mediante la teoría lineal y son conocidos desde el principio del siglo pasado. Para el tercer efecto se desarrolló una ecuación de olas (ecuación no lineal de Schrödinger) que proporciona una buena concordancia cuantitativa.



**Figura 2.24.** Convergencia en tiempo y espacio del oleaje: a) efecto simple más b) estado del mar irregular generan c) oleaje final.



**Figura 2.25.** Convergencia por corrientes.



**Figura 2.26.** Convergencia no lineal.

Para ejemplificar el efecto no lineal, con referencia a la figura anterior, se describe la curva de abajo (azul) donde muestra una evolución de oleaje lineal (falta de evolución). La curva del medio (verde) muestra la evolución según la ecuación cúbica no lineal de Schrödinger. La curva de arriba (rojo) muestra la evolución según una ecuación no lineal de Schrödinger modificada de más alto orden. Los experimentos revelan que las olas se comportan en la realidad de forma muy parecida a la curva de arriba.

### **Principales eventos ocurridos**

A lo largo de los años se han observado diferentes eventos en el mar en las costas oaxaqueñas que originan olas de gran altura (3 – 5 m) ocasionando, en la gran mayoría de los casos, pérdidas económicas y humanas, sin embargo, la gran mayoría de ellas son ocasionadas por fenómenos como tormentas y depresiones tropicales o huracanes. Cuando este tipo de eventos se presentan por este tipo de fenómenos se definen como mareas de tormenta. Existen otro tipo de factores que detonan este tamaño de olas como el movimiento de las corrientes marinas y su calentamiento a una distancia relativamente lejana de la costa, ocasionando un importante desplazamiento de agua hacia las costas. A este tipo de eventos se le conoce como marejada o mar de fondo, generando olas que se caracterizan por ser más estables y limpias según avanzan hacia la costa. Sobre este segundo tipo de eventos es en los que se enfocará la definición de esta amenaza.

Los eventos mostrados anteriormente solo produjeron daños estructurales en edificios pequeños y en zonas costeras, así mismo, los objetos a la deriva causaron daño en algunos edificios mayores con algunas inundaciones tierra adentro. Como puede observarse en el listado, los registros con los que se cuenta en la actualidad son muy pocos ya que no existe un número oficial de los eventos, además de ser un indicador de la baja ocurrencia del fenómeno de marejada, lo cual crea una gran incertidumbre en su definición y modelación numérica.

En la tabla 2.6 se presenta una lista de los diferentes fenómenos que han causado olas de considerable intensidad y que han ocasionado daños en las costas oaxaqueñas.

**Tabla 2.6.** Fenómenos de marejada ocurridos en los últimos años.

Fecha	Lugar	Altura (m)	Vel en mar (km/hr)		Coordenadas		PERDIDAS HUM
					LAT	LONG	
30-abr-10	Tehuantepec Oaxaca	1 - 2	250	280			
03-ago-09	Pacífico Sur, Costas de Oaxaca	3 - 5					
28-jul-09	Puerto Ángel, y Puerto Escondido	4 - 5					
27-jul-09	Oaxaca Salina Cruz						11
17-nov-06	Costas Oaxaca	4	100	120	14.2°	102.5°	
17-nov-06	Costas del Edo Oaxaca	4	75	95	14.5°	103.1°	
29-ago-06	Sur de Oaxaca	4	130	155	14.3°	99°	
28-ago-06	Sur-Este Oaxaca	4	100	120	14.5°	103.1°	
29-ago-06	Costa Sur de Oaxaca	4	130	155	14.3°	99°	
04-jun-06	Occidente de Oaxaca	2 - 3	45	65	16.5°	99.8°	
28-may-06	Costas de Oaxaca	4	75	95	15.8°	101°	
29-oct-97	Puerto Escondido	3 - 4	45	55	15.914°	97.185°	
06-oct-97	Entre puerto Ángel y puerto Escondido	2 - 3	185	240	15.73°	-96.85°	250
09-nov-97	Llano Grande Oaxaca	3 - 4	120	185	15.93°	97.245°	
21-jun-05	Toda la Costa del Edo de Oaxaca	3 - 4	150	200	14.5°	103.1°	300

Por tal razón, se ha decidido que para los fines de este proyecto, la amenaza de marejada se modelará como un caso especial de las olas generadas por tsunamis pequeños, los cuales presentarán características similares en altura de olas y por lo tanto, en los efectos que éstas generan, teniendo presente que los factores detonantes de ambos con completamente diferentes.

### **3. MODELO DE EVALUACIÓN DE LAS AMENAZAS**

#### **3.1 Amenaza sísmica**

##### **Introducción**

Para poder llevar a cabo una evaluación probabilista del riesgo, es necesario definir en términos cuantitativos las probabilidades de ocurrencia, y las incertidumbres asociadas de diferentes eventos de tal forma que todos los escenarios posibles queden cubiertos.

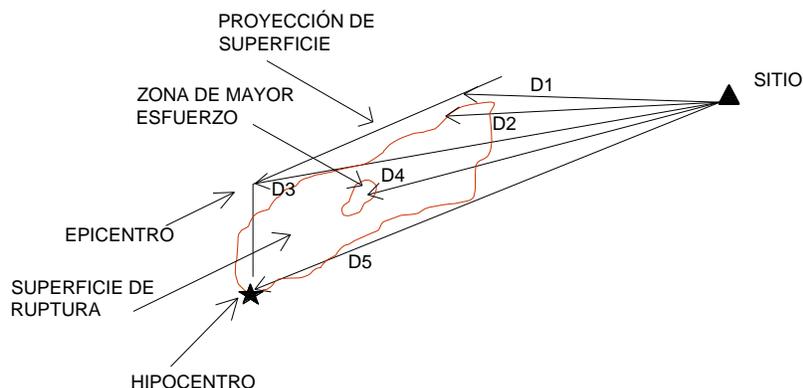
El peligro que induce la actividad sísmica sobre regiones aledañas con poblaciones o asentamientos humanos, ha derivado en la necesidad de establecer parámetros que definan el nivel de la amenaza y metodologías generales que permitan estimar dichos parámetros.

Los parámetros que definen el nivel de peligro en un modelo de amenaza sísmica se conocen como parámetros de movimiento fuerte. Estos parámetros definen la intensidad del movimiento en el sitio de análisis considerando la actividad sísmica de la región, la atenuación del movimiento y la amplificación por efectos locales. La actividad sísmica se define con los catálogos históricos de los sismos que han afectado la región y definiendo las características de los sismos que pueden llegar a presentarse, a partir de esta información se estiman las aceleraciones en roca por medio de ecuaciones conocidas como funciones de atenuación, las cuales dependen principalmente de la distancia de la fuente sismogénica al sitio, la magnitud sísmica, y el tipo de mecanismo focal de ruptura. Por último se toman en cuenta los suelos blandos de la región para considerar sus características de amplificación.

##### **Estimación de parámetros de movimiento fuerte**

La mayor parte de la energía de un sismo se libera en forma de ondas de esfuerzo, que se desplazan por la corteza de la tierra. Dado que la magnitud está relacionada con la energía liberada en el foco del sismo, la intensidad de dichas ondas se encuentra relacionada con la magnitud. Los efectos de la magnitud son principalmente: el aumento en la amplitud de la intensidad, la variación en el contenido frecuencial y el aumento en la duración de la vibración.

A medida que las ondas se desplazan por el medio rocoso, son absorbidas parcial y progresivamente por los materiales por los que transitan. Como resultado, la energía por unidad de volumen varía en función de la distancia. Dado que la intensidad está relacionada con la energía de las ondas, se encuentra también relacionada con la distancia. Muchas funciones de atenuación relacionan la intensidad en términos de algún parámetro de movimiento fuerte, con una de las distancias presentadas en la Figura 3.1., las cuales caracterizan de diferente manera el origen del movimiento vibratorio. La distancia D1 representa la distancia del sitio a la proyección en superficie del plano de falla. D2 es la distancia a la superficie de falla. D3 es la distancia epicentral. D4 corresponde a la distancia hasta la zona en la superficie de falla que liberó una mayor cantidad de energía, la cual no necesariamente corresponde con el hipocentro. Y por último D5 es la distancia hipocentral. El uso de alguna distancia en particular depende del parámetro a inferir. Por ejemplo D4 es la distancia que mejor se relaciona con los valores pico del movimiento fuerte, dado que la mayor parte del rompimiento se produce en esta zona.



**Figura 3.1.** Ejemplo de varias medidas de distancia usadas en funciones de atenuación.  
 (Fuente: Reproducido de Kramer S., Geotechnical Earthquake Engineering., Ed. Prentice Hall., 1996).

### Estimación de los parámetros de amplitud

La estimación de los parámetros de amplitud se hace comúnmente a partir de regresiones realizadas a partir de conjuntos de datos históricos en áreas con buena instrumentación sísmica. A continuación se describen algunos parámetros que definen la amplitud de un movimientos sísmico.

#### *Aceleración máxima*

La aceleración máxima es el parámetro más empleado en los estudios de amenaza sísmica para representar el movimiento del terreno, por lo cual se han propuesto diversos modelos de atenuación de este parámetro con la distancia y las propiedades del medio transmisor. A medida que se cuenta con mayor cantidad de registros de sismos, es posible refinar las funciones de atenuación, lo que deriva en una frecuente publicación de correlaciones nuevas y más refinadas. El nivel de refinamiento aumenta a medida que se desarrollan métodos de procesamiento más avanzados.

Un sinnúmero de funciones de atenuación de aceleración máxima se han desarrollado a nivel mundial en las últimas 4 décadas, dada la alta relevancia de este parámetro dentro de los análisis de amenaza sísmica. En un marco más local en relación al estado de Oaxaca, se han realizado estudios que utilizan bases de datos de movimientos fuertes para desarrollar leyes de atenuación propias del entorno sísmico y neotectónico de la región

#### *Velocidad Máxima*

Análisis similares a los realizados para la aceleración máxima del terreno han derivado en la obtención de relaciones de atenuación de la velocidad máxima horizontal a partir de la misma base de datos.

García *et al.* (2005) desarrollaron funciones de atenuación de velocidad para una región que comprende al estado de Oaxaca, dicha función se obtuvo empleando registros de sismos moderados a través de regresiones, teniendo ésta la siguiente forma:

$$\log PGV(cm/s^2) = -2.4 + 0.71M - 0.0023R + \log R + 0.004H + \sigma \quad (3.1)$$

$$\sigma_{\log PGV} = 0.26$$

### Ordenadas del espectro de respuesta

Dada la importancia que ha tenido el espectro de respuesta dentro de la práctica de la ingeniería sísmica, se han desarrollado relaciones de atenuación para obtener las ordenadas del espectro de manera directa. Esto puede realizarse a partir de regresiones sobre espectros calculados a registros acelerográficos de zonas con buena instrumentación sísmica.

### Amplitud del espectro de Fourier

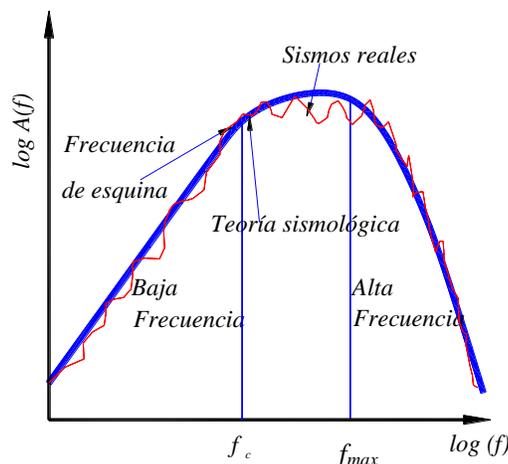
Alternativamente se puede calibrar un modelo teórico de las características físicas de una fuente, medio de tránsito de ondas, y comportamiento de la respuesta en el sitio, para predecir la forma del Espectro de Fourier. A partir de la solución del rompimiento instantáneo sobre una superficie esférica en un medio perfectamente elástico (Brune, 1970), es posible estimar las amplitudes del espectro de Fourier, en sismos lejanos por medio de la relación (McGuire & Hanks, 1981 y Boore, 1983):

$$|A(f)| = \left[ CM_o \frac{f^2}{1 - (f/f_c)^2} \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_{max})^8}} \right] \frac{\exp(-\pi f R / Q(f) v_s)}{R} \quad (3.2)$$

Donde  $f_c$  es la frecuencia de esquina,  $f_{max}$  la frecuencia máxima o de corte (ver Formula 3.1.2),  $Q(f)$  es el factor de calidad,  $M_o$  es el momento sísmico, y  $C$  es un constante dada por:

$$C = \frac{R_{\theta\phi} FV}{4\pi\rho v_s^3} \quad (3.3)$$

donde  $R_{\theta\phi}$  es el patrón de radiación,  $F$  depende del efecto de superficie libre,  $V$  da cuenta de la partición de la energía en dos componentes horizontales,  $\rho$  es la densidad de la roca, y  $v_s$  es la velocidad de onda de corte en la roca.



**Figura 3.2.** Modelo teórico de atenuación de Espectros de Fourier.

### *Duración*

La duración del movimiento aumenta al aumentar la magnitud sísmica. Sin embargo, la variación con la distancia depende de cómo se defina el parámetro. Para duraciones basadas en amplitudes de aceleración absoluta, como la determinada con el umbral de duración, tienden a disminuir a medida que aumenta la distancia, dado que la aceleración absoluta disminuye de la misma manera. Duraciones basadas en aceleraciones relativas se incrementan con la distancia, derivando en duraciones muy largas aún cuando las amplitudes sean muy pequeñas.

### **Metodologías generales para el cálculo de amenaza**

El cálculo de la amenaza sísmica emplea las definiciones y métodos presentados anteriormente, para establecer el nivel de peligro esperado en un sitio o zona determinada, bajo la influencia de la actividad sísmica de fuentes aledañas identificadas. Históricamente los ingenieros, geólogos y sismólogos se han preocupado por desarrollar metodologías de cálculo que representan cada vez mejor el comportamiento de las fuentes, el tránsito de las ondas dentro del medio rocoso, la respuesta de los suelos y la respuesta estructural en el sitio de interés. De esta manera, es posible identificar dos metodologías primordiales de evaluación de amenaza, que engloban los esfuerzos realizados en el pasado en diferentes estudios en el ámbito mundial.

### **Análisis determinístico de amenaza sísmica**

Durante muchos años el análisis determinístico de amenaza sísmica (Deterministic Seismic Hazard Analysis DSHA) fue la herramienta primordial de la ingeniería sísmica para la evaluación de la amenaza en una zona determinada. El uso del DSHA implica la definición de un escenario particular, en el cual se basa la estimación del movimiento del terreno y los efectos secundarios relacionados. El escenario se define como un sismo de magnitud conocida, el cual sucede en un sitio determinado. Los pasos a seguir, para llevar a cabo un DSHA, son:

1. Caracterización de las fuentes generadoras de terremotos con influencia en el sitio de análisis. Se requiere definir cada fuente en términos de su geometría y sismicidad.
2. Selección de la distancia de la fuente al sitio. Generalmente se toma la menor distancia existente entre la fuente y el lugar de análisis.
3. Selección del sismo de análisis, el cual representa de la mejor manera el potencial sísmico de la fuente en consideración, en términos de la intensidad en el sitio bajo estudio. Se debe escoger a partir de comparación de los niveles de intensidad generados por sismos históricos de la región, o de otras regiones con características neotectónicas similares, de tal manera que sea posible definir una magnitud del sismo de análisis para las distancias anteriormente definidas.
4. Selección de las funciones de atenuación que permitan caracterizar completamente la amenaza en el sitio. Según el alcance del análisis se requerirán funciones de atenuación de aceleración, velocidad, desplazamiento, componentes espectrales de los anteriores parámetros, duración, o cualquier otro parámetro.

El DSHA indica el peor caso posible del efecto sísmico en el sitio de análisis. Cuando se emplea el DSHA para la evaluación de la amenaza en estructuras primordiales, puede estimarse la mayor intensidad que puede afectar dichas estructuras. Sin embargo, no se toma en cuenta cuál es la probabilidad de ocurrencia de ese evento, si es probable o no que ocurra en el sitio escogido, qué tan probable es que suceda a lo largo de un período u determinado, ni cuál es el grado de incertidumbre asociado a las variables involucradas en el problema.

En general, el análisis determinístico no se emplea ni se recomienda como herramienta única del análisis de la amenaza sísmica. Puede ser usado principalmente como herramienta de calibración de modelos más refinados, siempre y cuando se cuente con información histórica suficiente, o para el análisis retrospectivo de eventos históricos específicos.

### **Análisis probabilístico de amenaza sísmica**

En la últimas décadas se ha desarrollado el enfoque probabilístico en los análisis de amenaza sísmica, con el fin de involucrar de manera analítica la incertidumbre asociada con las variables que intervienen en el peligro sísmico de una región. Parámetros como la frecuencia de ocurrencia de determinado sismo, la probabilidad de que ocurra en un sitio específico, probabilidades de excedencia de intensidades sísmicas, etc., son incluidos en los modelos de cálculo, para conformar un análisis probabilístico de amenaza sísmica (PSHA por sus siglas en inglés). Los pasos a seguir para llevar a cabo un PSHA son:

1. Caracterización de las fuentes generadoras de terremotos con influencia en el sitio de análisis, en términos de su geometría y distribución de probabilidad de puntos de inicio de la ruptura en el área de falla definida. Es usual asumir una distribución de probabilidad uniforme, lo cual implica que la ocurrencia de sismos se espera con igual probabilidad en cualquier lugar de la geometría de fuente definida. Determinación de la sismicidad de las fuentes consideradas, a partir del registro histórico de eventos ocurridos sobre la geometría anteriormente definida (catálogo sísmico), y de información y estudios de neotectónica y paleosismología para la fuente. La sismicidad se establece por medio de una curva de recurrencia de magnitudes, la cual es una relación específica para cada fuente, que indica cual es la tasa de excedencia de una magnitud sísmica particular.
2. Selección de las funciones de atenuación que permitan caracterizar completamente la amenaza en el sitio. Según el alcance del análisis se requerirán funciones de atenuación de aceleración, velocidad, desplazamiento, componentes espectrales de los anteriores parámetros, duración, etc. Debe involucrarse la incertidumbre asociada a la estimación de los parámetros, generalmente indicada en cada modelo de atenuación.
3. Finalmente se combinan las incertidumbres asociadas a localización, tamaño y atenuación y se obtiene una curva de amenaza, la cual indica la probabilidad que una intensidad específica sea igualada o excedida en un periodo de tiempo determinado.

## **Modelo analítico propuesto**

### **Generalidades**

Para la evaluación del riesgo sísmico en la región sureste del país, que es donde se localiza el estado de Oaxaca, se hace necesario identificar la amenaza sísmica de la manera más confiable posible, tanto a nivel de la roca base como en la superficie. La amenaza sísmica puede representarse mediante mapas de aceleraciones, velocidades y desplazamientos para diferentes períodos de retorno o para determinados escenarios sísmicos y de manera más específica, mediante espectros de aceleraciones, velocidades o desplazamientos para considerar la eventual respuesta de cualquier tipo de componente de infraestructura.

Inicialmente es necesario determinar un área de influencia que permita limitar el problema a la zona dentro de la cual los sismos son relevantes. En segundo lugar se requiere identificar las fuentes que dentro del área de influencia previamente establecida son capaces de generar sismos de importancia. Una vez identificadas, estas fuentes deben caracterizarse a través de ecuaciones basadas en los datos sísmicos existentes. A partir de aquí, se hace posible la evaluación probabilística de parámetros para análisis sísmicos en el sitio de interés.

En el presente estudio se ha desarrollado una metodología de cálculo de la amenaza, basada en la teoría sismológica clásica. Con base en la sismicidad de las fuentes del territorio y en las leyes de atenuación de los diferentes parámetros sísmicos, es posible identificar la amenaza sísmica de todas las fuentes que pueden generar efectos importantes sobre la región o para escenarios sísmicos específicos. El resultado fundamental de este tipo de análisis son las tasas de excedencia asociadas a períodos de recurrencia específicos.

La amenaza sísmica se cuantifica en términos de los períodos de recurrencia (o sus inversos, las tasas de excedencia) de las intensidades sísmicas relevantes para el comportamiento de las estructuras. La tasa de excedencia de una intensidad sísmica se define como el número medio de veces, por unidad de tiempo, en que el valor de esa intensidad sísmica será excedido.

Es posible determinar la amenaza sísmica contando las veces en que se han excedido valores de intensidad pre-determinadas en el sitio de interés. Sin embargo, la determinación directa rara vez se puede realizar porque no se dispone de catálogos completos con las aceleraciones que han producido los sismos en un sitio. Por lo anterior, resulta necesario calcular la amenaza sísmica de manera indirecta. Para ello, se evalúa primero la tasa de actividad sísmica en las fuentes generadoras de temblores y después se integran los efectos que producen, en un sitio dado, los sismos que se generan en la totalidad de las fuentes.

### **Selección**

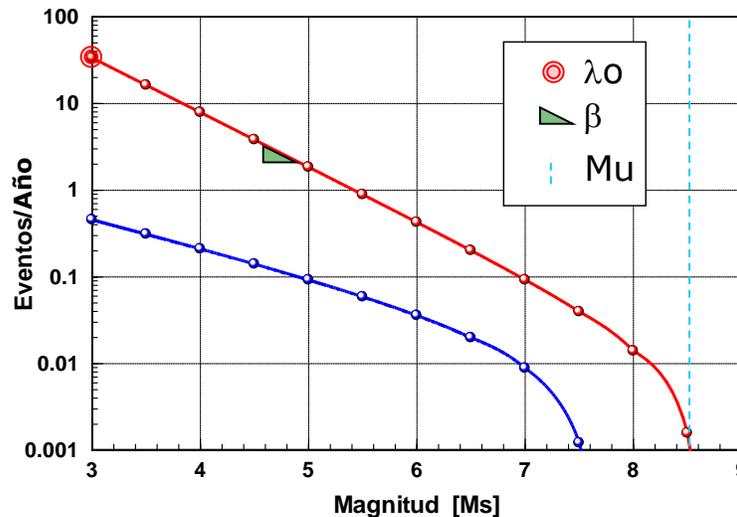
Como metodología general de cálculo se selecciona el modelo de amenaza probabilista, dado que permite la definición de escenarios de ocurrencia de terremotos, caracterizados por medio de su probabilidad de ocurrencia, y permite dar un tratamiento adecuado a la incertidumbre del problema. La estimación de parámetros de movimiento fuerte se hace por medio de las fuentes sismogénicas y las funciones de atenuación, las cuales se ajustan a las características tectónicas de la región oaxaqueña.

### Parámetros de sismicidad de fuentes sismogénicas

La actividad de la  $i$ -ésima fuente sísmica se especifica en términos de la tasa de excedencia de las magnitudes,  $\lambda_i(M)$ , generadas por esta fuente. La tasa de excedencia de magnitudes mide qué tan frecuentemente se generan temblores con magnitud superior a una específica. Para la mayor parte de las fuentes sísmicas, la función  $\lambda_i(M)$  es una versión modificada de la relación de Gutenberg y Richter. En estos casos, la sismicidad queda descrita de la siguiente manera:

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}} \quad (3.4)$$

donde  $M_0$  es la mínima magnitud relevante.  $\lambda_{0i}$ ,  $b_i$ , y  $M_{ui}$  son parámetros que definen la tasa de excedencia de cada una de las fuentes sísmicas. Estos parámetros, diferentes para cada fuente, se estiman por procedimientos estadísticos bayesianos (Rosenblueth y Ordaz, 1987; Ordaz y Arboleda, 1993), que incluyen información sobre regiones tectónicamente similares a las de nuestro país, más información experta, especialmente sobre el valor de  $M_{ui}$ , la máxima magnitud que puede generarse en cada fuente. En la Figura 3.3 se muestran dos tasas de excedencia para zonas sísmicas distintas, una para una zona de alta sismicidad capaz de generar sismos con  $M > 7.5$  y otra de baja sismicidad. Es claro que para una misma tasa de excedencia o tasa constante, ambas fuentes generan sismos con distinta magnitud; por ejemplo, si tomamos una tasa de 0.01 (periodo de retorno de 100 años), debemos esperar sismos mayores o iguales que 6.2 en la fuente de baja sismicidad, y mayores o iguales que 7.3 en la de alta sismicidad. Esto quiere decir que con la misma probabilidad o para la misma tasa de excedencia ambas fuentes generarán sismos de distinto tamaño.



**Figura 3.3.** Tasas de excedencia de fuentes para el modelo de sismicidad de Poisson.

De esta manera, cada una de las fuentes sismogénicas queda caracterizada mediante una serie de parámetros de sismicidad, los cuales se determinan con base en la información sísmica disponible. Los parámetros definidos son los siguientes:

- Valor beta: se identifica mediante el parámetro  $\beta$  que representa la pendiente del tramo inicial de la curva de recurrencia de magnitudes.

• Magnitud máxima  $M_u$ : se estima con base en la máxima longitud de ruptura posible de cada una de las fuentes y en otras características morfotectónicas.

• Tasa de recurrencia de sismos con magnitud mayor que 4.0 ( $\lambda_0$ ): corresponde al número promedio de eventos por año de sismos con magnitud mayor que 4.0 que se producen en una determinada fuente.

Aunque la forma funcional para  $\lambda_i(M)$  dada en la ecuación (3.4) se utiliza para la mayor parte de las fuentes sísmicas, se ha observado que la distribución de magnitudes de los grandes temblores de subducción ( $M > 7$ ) se aparta sensiblemente de la predicha por la relación de Gutenberg y Richter, dando origen al llamado *temblor característico* (Singh *et al.*, 1981). Por lo anterior, para los grandes temblores de subducción,  $\lambda_i(M)$  se define de la siguiente manera:

$$\lambda(M) = \lambda(7) \left[ 1 - \Phi \left( \frac{M - EM}{\sigma_M} \right) \right], \quad \text{si } M > 7 \quad (3.5)$$

donde  $\lambda(7)$ ,  $EM$  y  $\sigma_M$  son parámetros que se deben obtener estadísticamente para la zona de interés de subducción, y  $\Phi$  es la función de distribución normal estándar.

De esta manera, al definir los parámetros  $\lambda_0$ ,  $\beta$  y  $M_u$  o  $\lambda(7)$ ,  $EM$  y  $\sigma_M$ , queda definida por completo la sismicidad local de las fuentes.

### Atenuación de los parámetros de amenaza

Una vez determinada la tasa de actividad de cada una de las fuentes sísmicas, es necesario evaluar los efectos que, en términos de intensidad sísmica, produce cada una de ellas en un sitio de interés. Para ello se requiere saber qué intensidad se presentaría en el sitio en cuestión, hasta ahora supuesto en terreno firme, si en la  $i$ -ésima fuente ocurriera un temblor con magnitud dada. A las expresiones que relacionan magnitud, posición relativa fuente-sitio e intensidad se les conoce como leyes de atenuación. Usualmente, la posición relativa fuente-sitio se especifica mediante la distancia focal, es decir, la distancia entre el foco sísmico y el sitio. Las leyes de atenuación pueden adoptar muy diversas formas. Para el desarrollo de este proyecto se utilizarán diversas leyes de atenuación dependiendo del tipo de sismo. Se considera que las intensidades sísmicas relevantes son las ordenadas del espectro de respuesta  $S_a$ , (seudoaceleraciones, 5% del amortiguamiento crítico), cantidades que son aproximadamente proporcionales a las fuerzas laterales de inercia que se generan en las estructuras durante sismos.

Para definir el riesgo físico por sismo se consideran dos leyes de atenuación diferentes dependiendo de las trayectorias que recorren las ondas en su camino de la fuente al sitio.

*Tembloros costeros.* Se utiliza para la aceleración máxima del terreno provocada por temblores generados en la costa sur del Pacífico, la expresión que se emplea es aquella propuesta por Arroyo *et al.* (2010). Esta expresión fue construida a partir de 416 registros de aceleración obtenidos en 56 estaciones acelerográficas de 40 sismos de subducción ocurridos en Guerrero y Oaxaca principalmente.

Resultado de lo anterior, empleando un procedimiento de regresión Bayesiana, se define la siguiente expresión para determinar la aceleración máxima en el suelo.

$$\ln a_{ms} = \alpha_1 + \alpha_2 M_w + \alpha_3 \ln \left[ \frac{E_1(\alpha_4 R) - E_1(\alpha_4 \sqrt{R^2 + r_0^2})}{r_0^2} \right] \quad (3.6)$$

Donde  $\alpha_1 = 2.4862$ ,  $\alpha_2 = 0.9392$ ,  $\alpha_3 = 0.5061$ , y  $\alpha_4 = 0.0150$

2. Temblores de profundidad intermedia. En 2005 García *et al.*, realizaron regresión lineales sobre una base de 16 eventos sísmicos registrados en 51 estaciones, obteniendo finalmente 277 registros con la calidad suficiente para llevar a cabo el estudio, con magnitudes entre 5.2 y 7.4, y distancias hipocentrales desde 35 hasta 138 km. Con los datos anteriores, se define la siguiente expresión, definida específicamente para el tipo de sismos que se presentan en el estado de Oaxaca.

$$\log Sa(\text{cm/s}^2) = -0.2 + 0.59M - 0.0039R + \log R + 0.008H + \sigma$$

$$\sigma_{\log Sa} = 0.28 \quad (3.7)$$

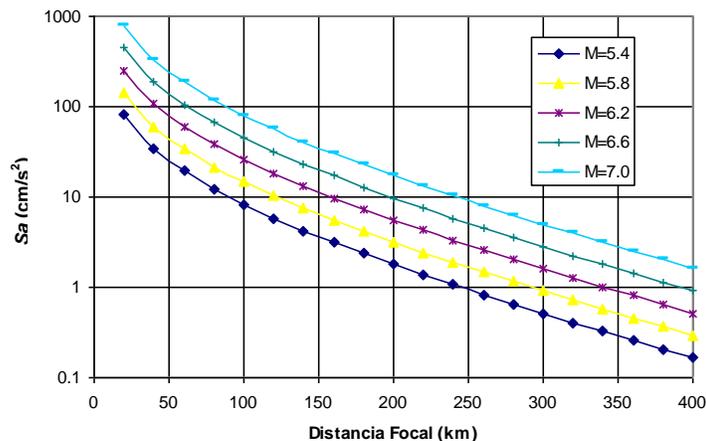
donde  $M$  es la magnitud de momento,  $R$  es el promedio de la distancia a la superficie de falla km, y  $H$  es la profundidad focal.

El valor de  $R$  se define como

$$R = \sqrt{R_{cld}^2 + \Delta^2} \quad (3.8)$$

donde  $R_{cld}$  es la distancia más cercana a la superficie de falla para sismos con magnitud mayor que 6.5 y  $\Delta$  es un término que define una saturación de fuente cercana definida analíticamente por Atkinson y Boore (2003) empleando consideraciones geométricas básicas.

Con base en las expresiones anteriores, se obtienen los resultados que se muestran en la figura 3.4

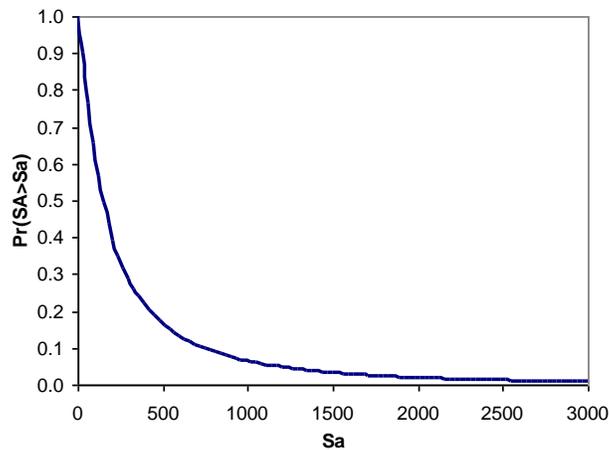


**Figura 3.4.** Ley de atenuación de la aceleración máxima del suelo ( $Sa$ ) para temblores de profundidad intermedia.

Dadas la magnitud y la distancia epicentral, la intensidad sísmica no está exenta de incertidumbre por lo que no puede considerarse determinista. Suele suponerse que, dadas la magnitud y la distancia, la intensidad  $Sa$  es una variable aleatoria distribuida lognormalmente con mediana dada por la ley de atenuación y desviación típica del logaritmo igual a  $\sigma_{\log Sa}$ . Dado lo anterior, la probabilidad de que la intensidad exceda un cierto valor, dadas la magnitud del sismo  $M$ , y la distancia entre la  $i$ -ésima fuente y el sitio  $R_i$  se define como

$$\Pr(SA > Sa | M, R_i) = \Phi\left(\frac{E(\log Sa | M, R_i) - \log Sa}{\sigma_{\log Sa}}\right) \quad (3.9)$$

siendo  $\Phi(\cdot)$  la distribución normal estándar,  $E(\log Sa | M, R_i)$  el valor medio del logaritmo de la intensidad (dado por la ley de atenuación correspondiente) y  $\sigma_{\log Sa}$  su correspondiente desviación estándar.



**Figura 3.5.** Función de probabilidad de que la pseudoaceleración ( $Sa$ ) sea excedida.

Además de lo anterior, se pueden utilizar leyes de atenuación espectrales que toman en cuenta el hecho de que la atenuación es diferente para ondas de diferentes frecuencias, con lo cual es posible calcular el espectro de respuesta esperado dadas una magnitud y una distancia.

Tomando la misma base de datos descrita anteriormente, García *et al.* (2005) desarrollaron funciones espectrales de atenuación de la pseudoaceleración ( $Sa$ ) para 0.2, 0.25, 0.33, 0.5, 0.67, 1.0, 1.33, 2.0, 2.5, 3.33, 5.0, 10.0, 13.33, 20.0 y 25.0 Hz. Para ello, proponen la ecuación 1.9, donde los coeficientes asociados a la atenuación de dichas ordenadas espectrales para las componentes horizontales se muestran en la tabla 3.1.

$$\log Sa(cm/s^2) = c_1 + c_2 M + c_3 R - c_4 \log R + c_5 H + \sigma \quad (3.10)$$

Y la desviación estándar  $\sigma$ , asociada a las ordenadas espectrales se define como

$$\sigma_{\log Sa} = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_e^2} \quad (3.11)$$

**Tabla 3.1.** Coeficientes de atenuación para la  $S_a$  horizontal, García *et al.* (2005).

$f(\text{Hz})$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$\sigma^*$	$\sigma_r$	$\sigma_e$
0.2	-4.3	0.97	-0.0007	1	0.001	0.25	0.22	0.12
0.25	-3.9	0.94	-0.0008	1	0.0009	0.25	0.22	0.12
0.33	-3.3	0.89	-0.0009	1	0.0009	0.26	0.22	0.14
0.5	-2.7	0.85	-0.0012	1	0.001	0.26	0.24	0.1
0.67	-2.3	0.81	-0.0014	1	0.002	0.28	0.26	0.1
1	-1.7	0.75	-0.0017	1	0.003	0.28	0.26	0.09
1.33	-1.3	0.71	-0.002	1	0.004	0.27	0.26	0.09
2	-0.8	0.67	-0.0024	1	0.004	0.26	0.24	0.11
2.5	-0.6	0.64	-0.0028	1	0.005	0.27	0.24	0.13
3.33	-0.3	0.63	-0.0033	1	0.005	0.28	0.23	0.16
5	0.05	0.59	-0.0037	1	0.007	0.28	0.24	0.14
10	0.4	0.55	-0.0041	1	0.008	0.33	0.32	0.1
13.33	0.2	0.57	-0.0043	1	0.008	0.34	0.32	0.1
20	0.1	0.58	-0.0043	1	0.008	0.34	0.32	0.09
25	0.03	0.59	-0.0043	1	0.007	0.32	0.31	0.08

De igual forma, para las componentes verticales se determinaron los factores que aparecen en la tabla 3.2, empleando las ecuaciones generales que se define párrafos arriba (ecuaciones 3.10 y 3.11)

**Tabla 3.2.** Coeficientes de atenuación para la  $S_a$  vertical, García *et al.* (2005).

$f(\text{Hz})$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$\sigma^*$	$\sigma_r$	$\sigma_e$
0.20	-4.40	0.98	-0.0003	1.00	-0.0002	0.26	0.22	0.14
0.25	-4.00	0.95	-0.0004	1.00	-0.0003	0.27	0.23	0.15
0.33	-3.30	0.88	-0.0005	1.00	-0.0004	0.28	0.23	0.17
0.50	-2.80	0.83	-0.0006	1.00	-0.0005	0.27	0.24	0.14
0.67	-2.40	0.80	-0.0008	1.00	0.0004	0.26	0.23	0.12
1.00	-1.80	0.75	-0.0010	1.00	0.0010	0.27	0.24	0.12
1.33	-1.30	0.69	-0.0014	1.00	0.0020	0.25	0.22	0.11
2.00	-0.90	0.66	-0.0018	1.00	0.0020	0.26	0.23	0.11
2.50	-0.70	0.64	-0.0022	1.00	0.0030	0.26	0.23	0.13
3.33	-0.20	0.60	-0.0029	1.00	0.0030	0.26	0.22	0.15
5.00	-0.07	0.59	-0.0033	1.00	0.0040	0.26	0.22	0.14
10.00	-0.04	0.59	-0.0039	1.00	0.0070	0.31	0.29	0.11
13.33	-0.06	0.6	-0.0041	1.00	0.0070	0.32	0.31	0.09
20	-0.2	0.62	-0.0043	1.00	0.0070	0.32	0.31	0.08
25	-0.3	0.62	-0.0041	1.00	0.0060	0.31	0.3	0.07

### Cálculo de la amenaza sísmica

Una vez conocidas la sismicidad de las fuentes y los patrones de atenuación de las ondas generadas en cada una de ellas, puede calcularse la amenaza sísmica considerando la suma de los efectos de la totalidad de las fuentes sísmicas y la distancia entre cada fuente y el sitio donde se encuentra la estructura. La amenaza, expresada en términos de las tasas de excedencia de intensidades  $S_a$ , se calcula mediante la siguiente expresión:

$$v(S_a) = \sum_{n=1}^N \int_{M_o}^{M_u} -\frac{\partial \lambda}{\partial M} \Pr(SA > S_a | M, R_i) dM \quad (3.12)$$

donde la sumatoria abarca la totalidad de las fuentes sísmicas  $N$ , y  $\Pr(SA > S_a | M, R_i)$  es aquella definida con la ecuación 1.9. Las funciones  $\lambda_i(M)$  son las tasas de actividad de las fuentes sísmicas. La integral se realiza desde la intensidad menor esperada,  $M_o$ , hasta la mayor intensidad que se puede presentar en una fuente,  $M_u$ , lo que indica que se toma en cuenta, para cada fuente sísmica, la contribución de todas las magnitudes.

Conviene hacer notar que la ecuación anterior sería exacta si las fuentes sísmicas fueran puntos. En realidad son volúmenes, por lo que los epicentros no sólo pueden ocurrir en los centros de las fuentes sino, con igual probabilidad, en cualquier punto dentro del volumen correspondiente. Se debe tomar en cuenta esta situación subdividiendo las fuentes sísmicas en triángulos, en cuyo centro de gravedad se considera concentrada la sismicidad del triángulo. La subdivisión se hace recursivamente hasta alcanzar un tamaño de triángulo suficientemente pequeño como para garantizar la precisión en la integración de la ecuación anterior (Figura 3.6).



**Figura 3.6.** Subdivisión de las zonas generadoras de sismos de subducción.

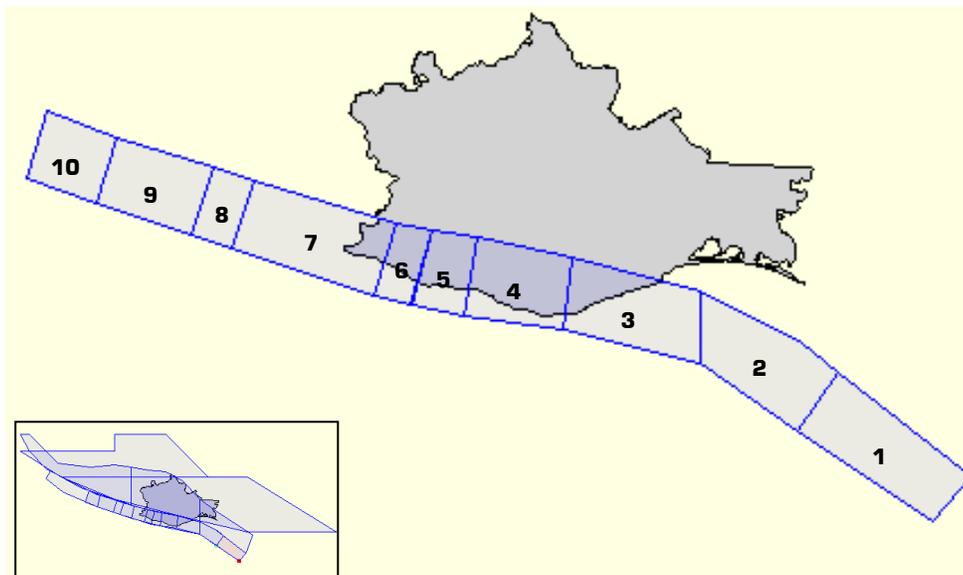
### Fuentes consideradas

Como se indicó anteriormente, el procedimiento común para calcular el peligro sísmico el territorio en estudio es: primero, dividir la zona de generación en fuentes sísmicas de acuerdo con consideraciones geotectónicas; en la mayoría de los casos, se asume que, dentro de una fuente sísmica, puede darse un proceso independiente de ocurrencia de

temblor. En las figuras 3.1 a 3.3 se muestran las fuentes sísmicas que se tomaron en cuenta, y que afectan al territorio oaxaqueño, para la estimación de los mapas de amenaza sísmicos.

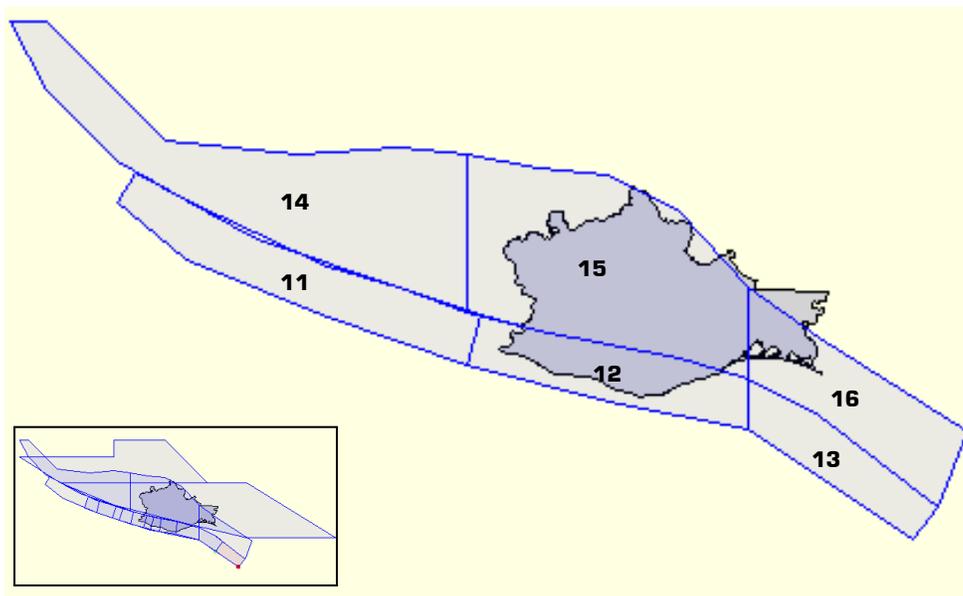
Para los fines de este estudio, las fuentes sísmicas que afectan Oaxaca se ha dividido en 18 fuentes generadoras de sismos. Estas fuentes están dictadas por la tectónica del país y por la historia instrumental de sismos registrados en el pasado (Zúñiga, 1994). Cada una de estas fuentes genera temblores a una tasa constante.

Los grandes temblores en México ( $M_s \geq 7.0$ ) a lo largo de la costa del Pacífico oaxaqueño, son causados por la subducción de las placas oceánicas de Cocos bajo la placa de Norteamérica y por ello son conocidos como sismos de subducción. La velocidad relativa de la placa de Cocos con respecto al continente varía desde unos 5 cm/año cerca de Manzanillo hasta 7 cm/año en Chiapas.



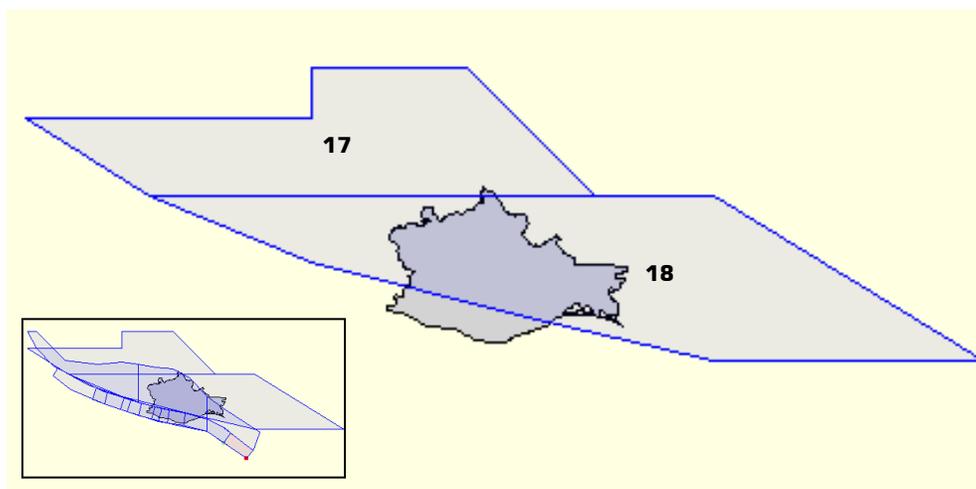
**Figura 3.7.** Fuentes sísmicas de Subducción consideradas en el territorio oaxaqueño.

Los grandes temblores también ocurren en el continente con profundidades de unos 60 km. En este caso los temblores presentan un mecanismo de fallamiento normal que refleja el rompimiento de la litosfera oceánica subducida. Si bien este tipo de eventos es poco frecuente, se sabe que pueden causar grandes daños. Algunos ejemplos de estos sismos son el de Oaxaca del 15 de enero de 1931 ( $M_s$  7.8), el de Orizaba del 23 de agosto de 1973 ( $M_s$  7.3) y el de Huajuapán de León del 24 de octubre de 1980 ( $mB$  7.0).



**Figura 3.8.** Fuentes sísmicas de Profundidad Intermedia con afectación en el territorio oaxaqueño.

Aún menos frecuentes son los temblores que ocurren dentro de la placa continental ( $M_s \leq 7$ ). Dependiendo de su ubicación, tales eventos pueden generar daños considerables en los asentamientos humanos. Existe también lo que podría llamarse sismicidad de fondo, consistente en temblores con  $M \leq 5.5$ , cuyo origen no puede asociarse a ninguna estructura geológica en particular.



**Figura 3.9.** Fuentes sísmicas Intraplaca con afectación en el territorio oaxaqueño.

Para cada fuente sísmica las tasas de excedencia de magnitudes,  $\lambda(M)$ , son estimadas por medio de análisis estadísticos de catálogos de sismos. En las tablas 3.3 y 3.4. se presentan las listas de los parámetros empleados para cada una de estas tasas por las fuentes indicadas en las figuras anteriores. Estos parámetros se emplean en las ecuaciones de  $\lambda(M)$  ya descritas.

**Tabla 3.3.** Parámetros de sismicidad de las fuentes de sismos característicos.

ID	FUENTE	$1/\lambda(7)$	EM	$\sigma M$
1	Subducción Chiapas	18.70	7.50	0.27
2	Subducción Brecha de Tehuantepec	24.70	7.50	0.27
3	Subducción Oaxaca Este	24.80	7.50	0.27
4	Subducción Oaxaca 1	39.40	7.50	0.27
5	Subducción Oaxaca 2	77.90	7.50	0.27
6	Subducción Oaxaca Oeste	104.70	7.50	0.27
7	Subducción Ometepec	26.70	7.50	0.27
8	Subducción San Marcos	89.90	7.50	0.27
9	Subducción Guerrero	39.70	7.50	0.27
10	Subducción Petatlán	52.60	7.50	0.27

**Tabla 3.4.** Parámetros de sismicidad de las fuentes con modelo de Poisson.

ID	FUENTE	$\lambda(M_0)$	$\beta$	$M_u$	$M_o$
11	Subducción Gro-Mich $M < 7$	4.79	1.55	7.20	4.50
12	Subducción Oaxaca $M < 7$	6.72	1.85	7.20	4.50
13	Subducción Chiapas $M < 7$	18.94	2.06	7.20	4.50
14	Prof. Intermedia Oeste	2.16	1.80	7.80	4.50
15	Prof. Intermedia Centro	1.71	1.80	7.80	4.50
16	Prof. Intermedia Este	2.78	1.80	7.80	4.50
17	Eje Volcánico Norte	0.25	1.88	7.39	4.50
18	Intraplaca someros	1.44	1.89	7.37	4.50

### Integración espacial

Como se mencionó anteriormente, se asume que, dentro de una fuente, la sismicidad está distribuida uniformemente por unidad de área. Para tomar en cuenta correctamente esta hipótesis en el modelo, se realiza la integración espacial subdividiendo las fuentes originales. Una vez dividida en sub-fuentes, toda la sismicidad asociada a una sub-fuente se asocia a un solo punto y de esta forma la integración espacial adopta una forma de suma.

Las fuentes son dadas originalmente como los polígonos mostrados en las figuras 3.7 a 3.9. Primero, el área de cada fuente se subdivide en  $N-2$  triángulos. Estos triángulos a su vez, se dividirán cuando se cumpla una de las dos condiciones siguientes:

1) El tamaño del triángulo es menor que cierto valor dado, el "tamaño mínimo de triángulo". Es decir, el triángulo es subdividido si todavía es grande.

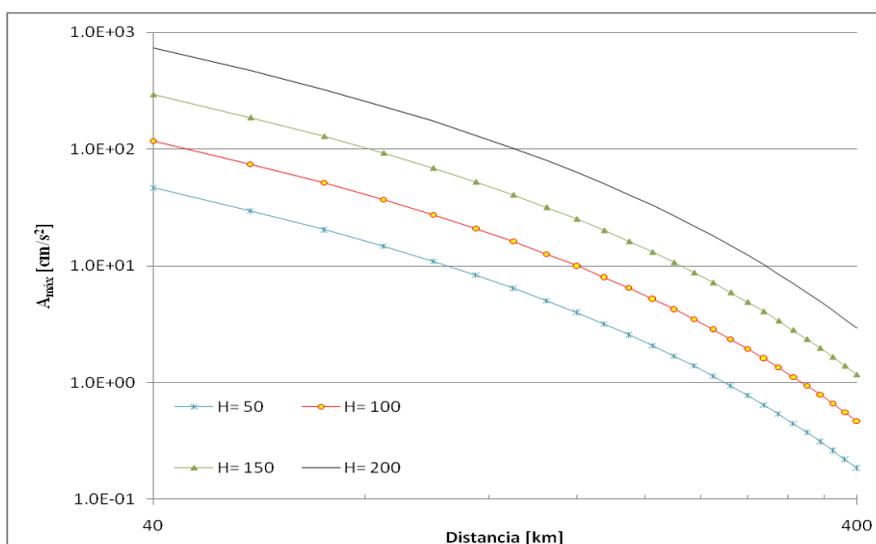
2) La razón entre la distancia sitio-fuente y el tamaño del triángulo es mayor que el valor de la razón entre "distancia mínima"/tamaño del triángulo. En otras palabras, el triángulo se subdivide si el sitio todavía no está lo suficientemente lejos.

La sub-sub-división se realiza por medio de una función recursiva. La distancia sitio-fuente se mide desde el sitio de cálculo actual al centroide del triángulo cuya posible subdivisión está siendo examinada. El tamaño del triángulo es simplemente la raíz cuadrada de su área. La

sismicidad asociada a cada centroide es proporcional al área del triángulo. Si un triángulo tiene que subdividirse, esto se hace subdividiendo el triángulo en cuatro partes nuevas, cuyos vértices son los puntos medios de los tres lados del triángulo original.

### Curvas de atenuación

Empleando la información de las leyes de atenuación anteriormente descritas y la información de las fuentes sísmicas, es posible definir para cualquier evento sísmico, la relación de distancia contra intensidad de cada fuente. Con estos datos se obtienen tablas y gráficas que se pueden emplear en la estimación de la amenaza sísmica, un ejemplo de estas gráficas se muestra en la figura 3.10 donde para diferentes profundidades y aceleraciones máximas en la fuente se obtienen las aceleraciones para diferentes distancias.



**Figura 3.10.** Valores medios de las relaciones intensidad vs. distancia para eventos de las fuentes sísmicas que afectan el territorio oaxaqueño.

Es importante mencionar que estas estimaciones tienen una incertidumbre asociada, por lo que los valores obtenidos con estos datos indican el valor medio de una función de distribución.

### Modificación de los parámetros de amenaza por efectos de sitio

Durante un sismo, se presentan principalmente dos tipos de respuesta de sitio que pueden llegar a producir problemas de consideración. Uno en el que el suelo modifica el contenido frecuencial y la amplitud del sismo, haciéndolo más o menos destructivo; en el otro el suelo mismo falla y se fisura, moviéndose horizontal y verticalmente.

El comportamiento dinámico de depósitos estratificados se modela mediante funciones de transferencia espectrales, las cuales permiten conocer el valor de amplificación por el cual se deben modificar las aceleraciones espectrales calculadas a nivel de terreno firme. Estas funciones de transferencia deben construirse para diferentes valores de aceleración máxima

del terreno, con el fin de tener en cuenta el efecto no lineal de degradación de los suelos. En la Figura 3.10 se presenta una función de transferencia espectral típica.

Para poder estimar de manera adecuada las intensidades sísmicas a las que se va a encontrar sujeta una estructura, es necesario identificar y determinar los efectos locales que se puedan presentar ante la ocurrencia de un sismo, estos efectos pueden ser de atenuación (en la mayoría de los casos) o de amplificación, conocidos como efectos de sitio.

### **Estudios de microzonificación en Oaxaca**

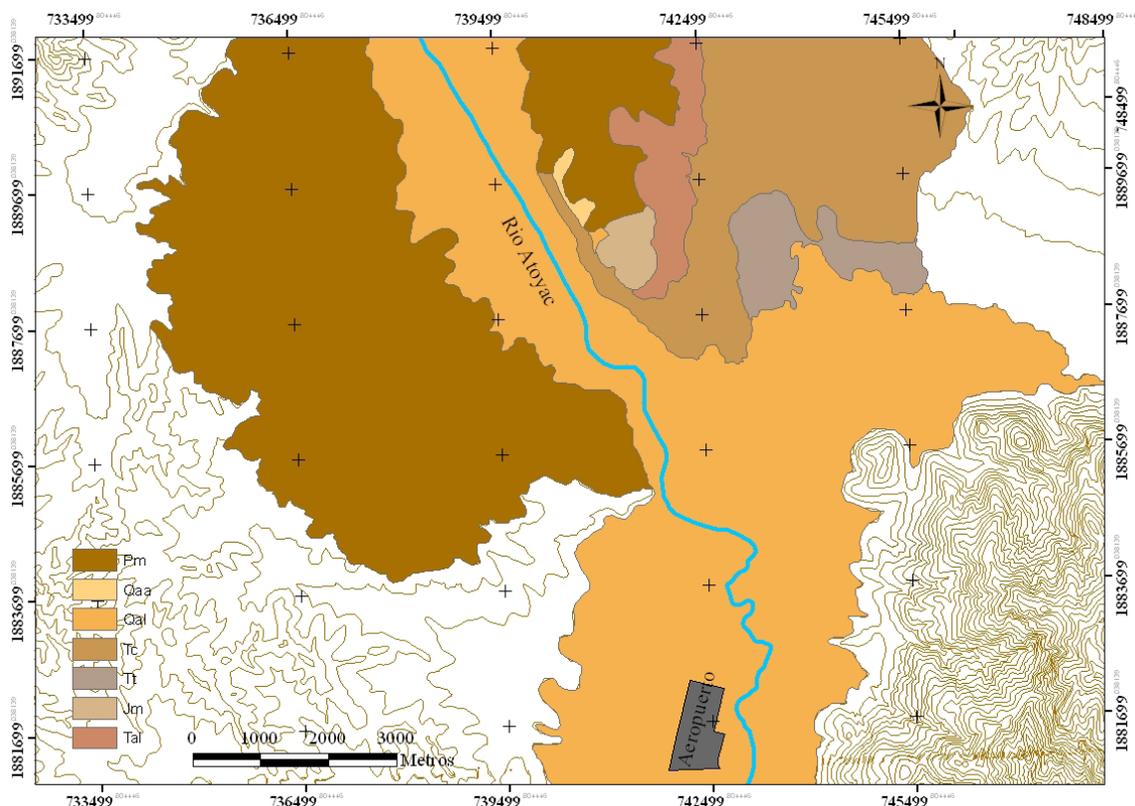
La ciudad de Oaxaca se encuentra en una región sísmica importante en la República Mexicana, por ello se debe tomar en cuenta el estudio del efecto de sitio para la estimación del Riesgo, un estudio de microzonificación completo deben contemplar información geológica, mediciones del suelo e información geotécnica.

Su metodología debe incluir al menos (Limaymanta, 2009):

1. Recopilar toda la información geológica, geotécnica y geofísica, en caso de ser posible corroborar los datos con trabajos de campo.
2. Calcular funciones de transferencia empírica (FTE) con registros de microtemores, en caso de que la ciudad cuente con una red acelerográfica o sísmica, se debe considerar los registros de sismos locales o regionales para complementar los datos obtenidos con microtemores.
3. Obtener un modelo estratigráfico representativo para cada zona y calcular la función de transferencia teórica (FTT) con el modelo unidimensional de Haskell, 1962.

### **Geología**

Abordando el tema de la geología, León, J., 1976 propuso una zonación que divide a la ciudad en siete zonas identificadas con las letras Pm, Qaa, Qal, Tc, Tt, Jm y Tal. En la figura 3.11 se presenta geográficamente cada uno de estos depósitos y en los párrafos siguientes se transcribe la descripción que realizó León, J., 1976 de estas formaciones solo con fines de identificar los tipos de suelos de cada región.



**Figura 3.11.** Geología de la ciudad de Oaxaca (León J., 1976).

**Rocas metamórficas (Pm):** Situadas al oeste de la ciudad, en los cerros de la zona arqueológica de Monte Albán y al pie del cerro del Fortín, en esta zona afloran rocas metamórficas del Paleozoico las cuales se encuentran intemperizadas en su superficie y dan lugar a un suelo limo-arenoso de color amarillento. Es importante mencionar que el desarrollo urbano de esta zona se limita a la franja que se ubica en la parte baja del cerro del Fortín.

**Calizas, areniscas, lutitas y conglomerados metamorfozados (Jm):** Esta formación que se encuentra sobreyaciendo las rocas metamórficas se originó a partir de calizas, areniscas, lutitas y conglomerados. El contacto entre la formación paleozoica y estos materiales está indicado por una falla con dirección E-W. El material que predomina son los conglomerados de grano fino y una fuerte silicificación. En cuanto al color es muy variable; en su parte inferior, en estratos delgados, el color de la roca es blanco; y en la parte superior donde se observa un conglomerado en bancos de 1 m de espesor aproximadamente, el color es gris oscuro con intercalaciones de estratos delgados de areniscas y lutitas. La edad de esta formación es variable pudiendo estar entre el Triásico y el Jurásico.

**Areniscas y lutitas (Tal):** Se encuentra sobreyaciendo las rocas anteriores como una sucesión de capas formadas por areniscas y lutitas del terciario. Son de color café amarillento y están recubiertas parcialmente por una capa de materiales intemperizados del mismo color. Una parte de la ciudad de Oaxaca se ha desarrollado sobre esta formación.

**Tobas andesíticas (Tt):** Situada al noreste de la ciudad, de color verde claro, explotado como piedra para cantera y sobreyace la formación antes mencionada, el contacto de este depósito con los depósitos clásticos no se define con exactitud, ya que se encuentra



parcialmente recubierto por estos. El desarrollo urbano de la ciudad se ha extendido sobre estos depósitos.

**Depósitos clásticos continentales (Tc):** Una erosión entre fines del Terciario y principios del Cuaternario dio origen a la sedimentación de los depósitos clásticos. La parte superior de estos depósitos están constituidos por limos arenosos de color café rojizo mientras que a profundidad el material está constituido por grava compacta dentro de una escasa matriz arenosa. Es importante mencionar que en un inicio la ciudad de Oaxaca se desarrolló sobre estos depósitos.

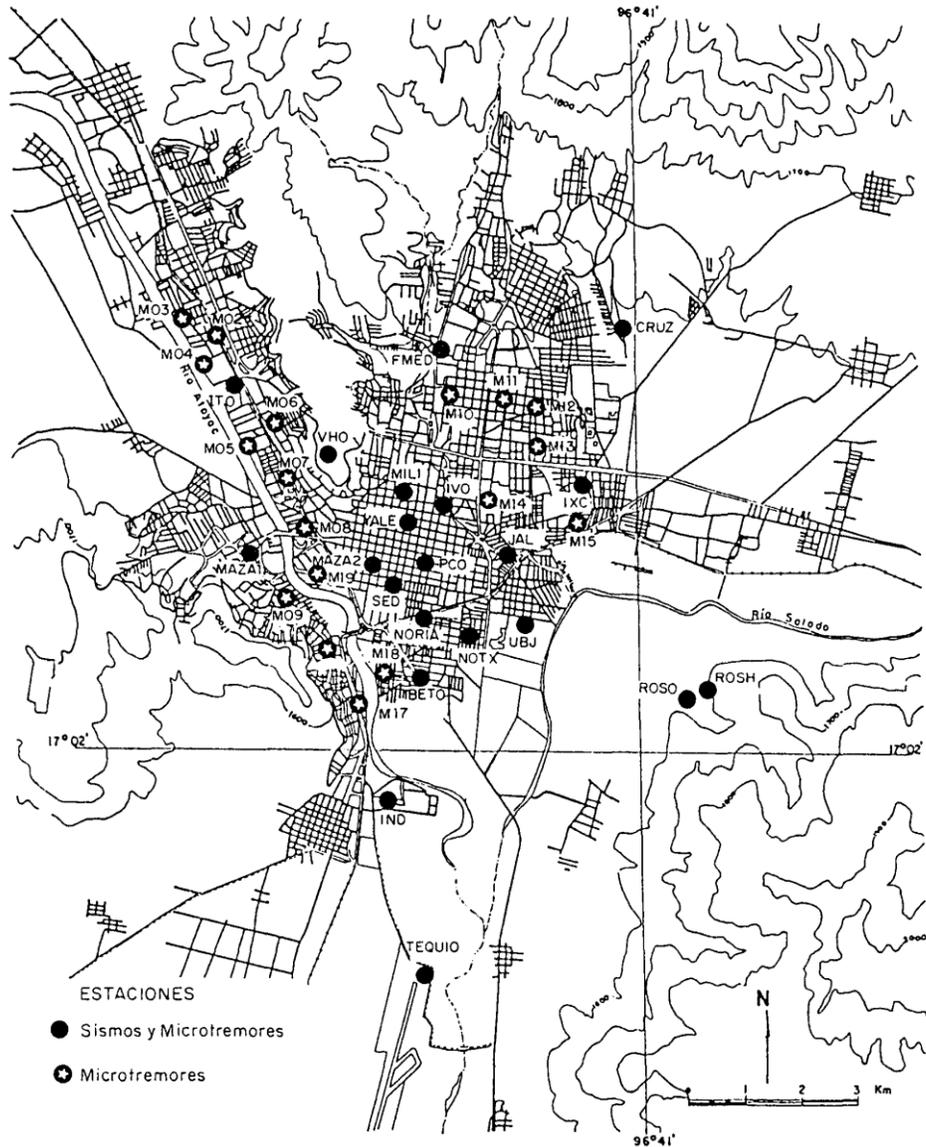
**Depósitos aluviales (Qal):** Constituidos por limos y arenas sueltas del cuaternario que provienen de aluviones de los ríos que entran al valle. Estos materiales se localizan en gran parte a lo largo del río Atoyac, presentan un espesor promedio de 30 m (León J., 1976) y son explotados para obtener agua subterránea. En algunas ocasiones estos depósitos son afectados por inundaciones.

**Depósitos de abanico aluvial (Qaa):** Se localiza en las partes bajas del cerro del Fortín, están constituidos por grava subredondeada y angulosa en una matriz limo-arenosa.

Esta información es muy útil para determinar los límites del suelo, tales como afloramientos de roca donde los efectos de sitio no se presentan o regiones de asentamientos de material blando como lechos de ríos o lagos donde se pueden presentar efectos de sitio importantes.

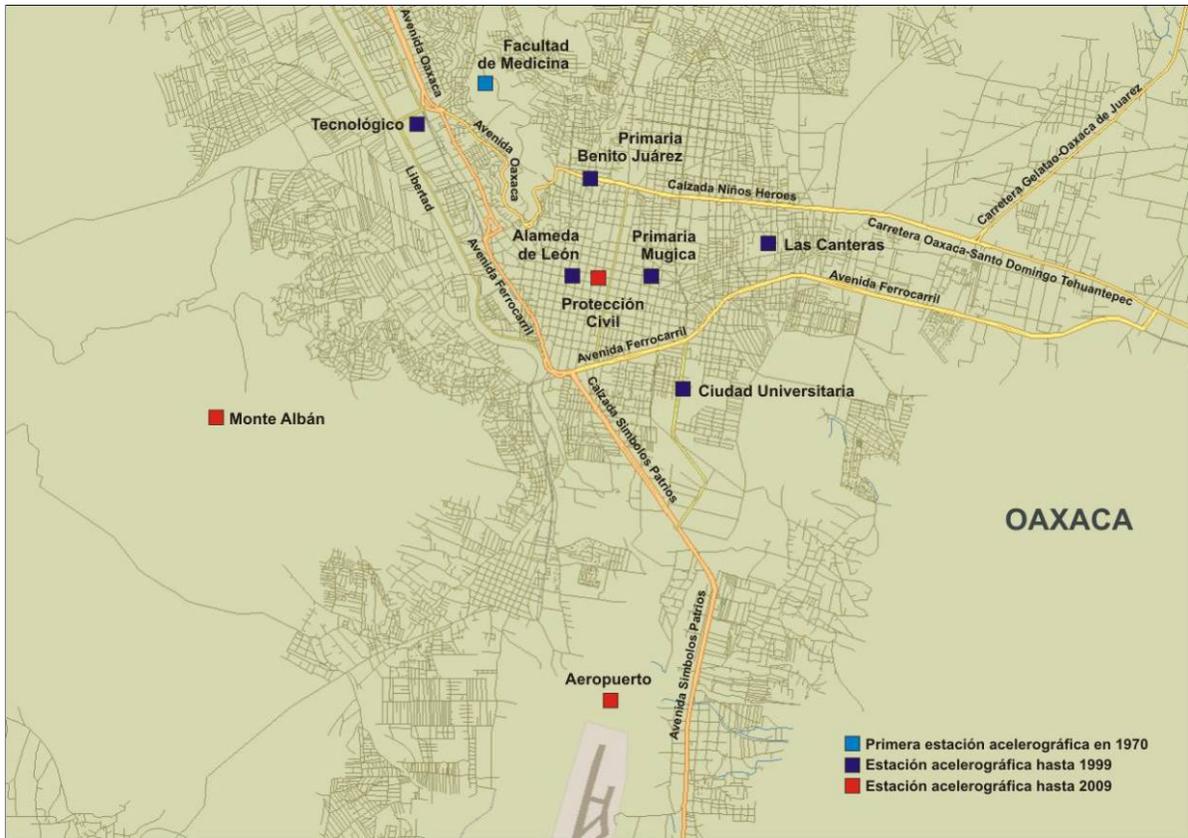
### **Mediciones del suelo**

Sobre este tema se empleo diferente tipo de información, desde registros de movimiento fuerte hasta mediciones de vibración ambiental. Lermo *et al.*, en 1991 presentaron un mapa de microzonificación en la que proponen tres zonas de acuerdo al periodo del suelo y la amplificación obtenida con estaciones temporales y registros de vibración, el arreglo de información empleada se muestra en la figura 3.12.



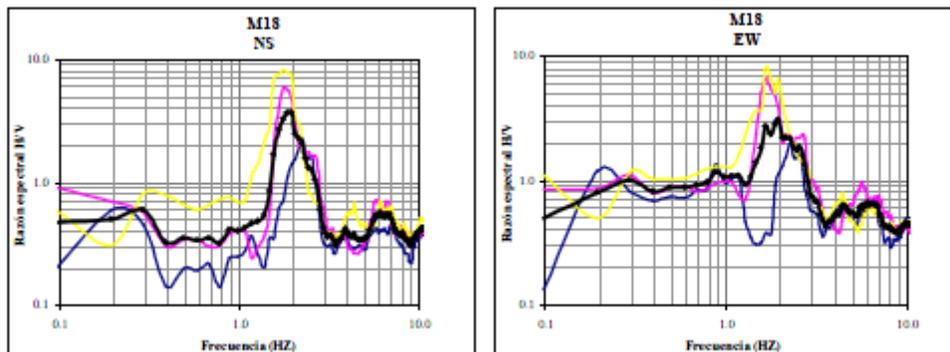
**Figura 3.12.** Localización de registros de microtemores en la ciudad de Oaxaca (Lermo *et al.*, 1991).

Adicionalmente se uso la información de los sismos registrados en estaciones fijas cuyo arreglo se muestra en la figura 3.13.

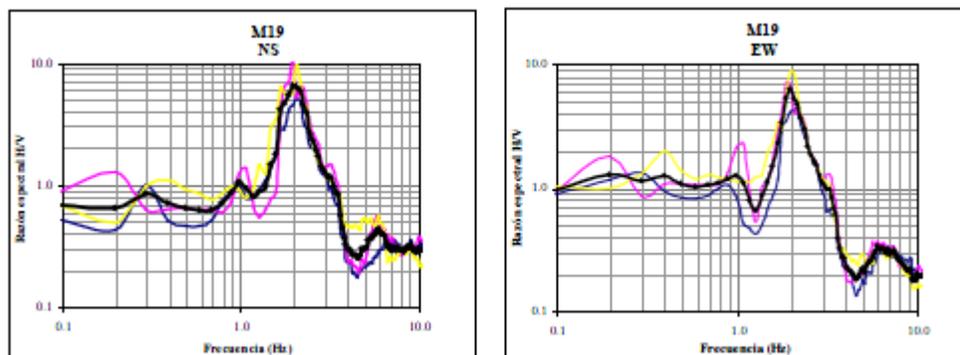


**Figura 3.13.** Localización de registros de sismo en estaciones fijas en la ciudad de Oaxaca.

La información recabada tanto de los registros de vibración ambiental como de estaciones fijas se empleó para obtener funciones de transferencia empírica (FTE) que nos proporcionan el periodo del sitio y una idea de la amplificación que se puede presentar en el mismo. En la figura 3.14 se muestran ejemplos de estas funciones.



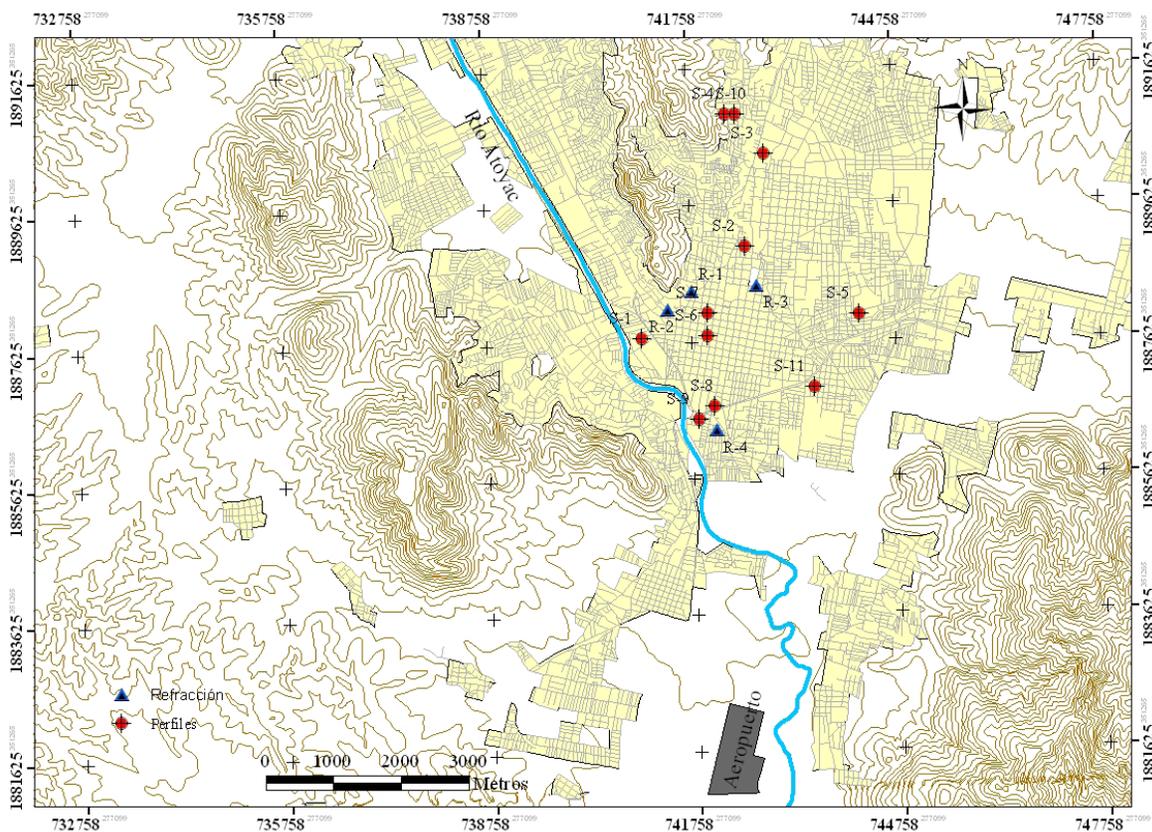
**Figura 3.14.** FTE en dos direcciones para los puntos M18 y M19 (continúa).



**Figura 3.14.** FTE en dos direcciones para los puntos M18 y M19 (continuación).

### Geotecnia

La geotecnia de esta ciudad fue estudiada con perfiles estratigráficos obtenidos de sondeos de penetración estándar reportados en el trabajo de León J., 1976 los cuales provienen de 11 estudios de mecánica de suelos. En la figura 3.15 se presenta la ubicación de los sondeos S-1 al S-11 y el Anexo B muestra la información estratigráfica de estos sondeos en función de los diferentes materiales y de su resistencia dada por el número de golpes de la prueba.

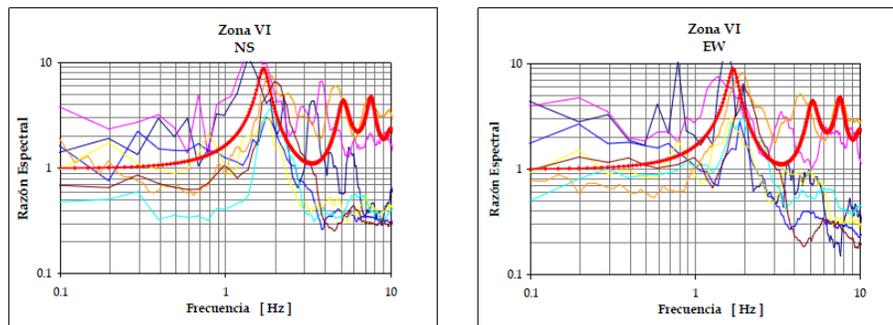


**Figura 3.15.** Ubicación de los sondeos de penetración estándar.

Con esta información se realizó un modelo de tipo Haskell, 1962, para obtener la función de transferencia teórica (FTT). En la tabla 3.1 se muestran los datos utilizados para el modelado los cuales se infirieron con los sondeos y la figura 3.16

**Tabla 3.5.** Datos empleados para obtener la FFT en uno de los sitios.

Nº	H	$\rho$	$\beta$	$\xi$
	(m)	(t/m <sup>3</sup> )	(m/s)	(1)
1	5.0	1.4	135.0	0.04
2	5.5	1.5	200.0	0.04
3	4.0	1.4	120.0	0.04
4	6.5	1.4	180.0	0.04
5	9.5	1.6	320.0	0.04
base	-	2.5	2200.0	0.01

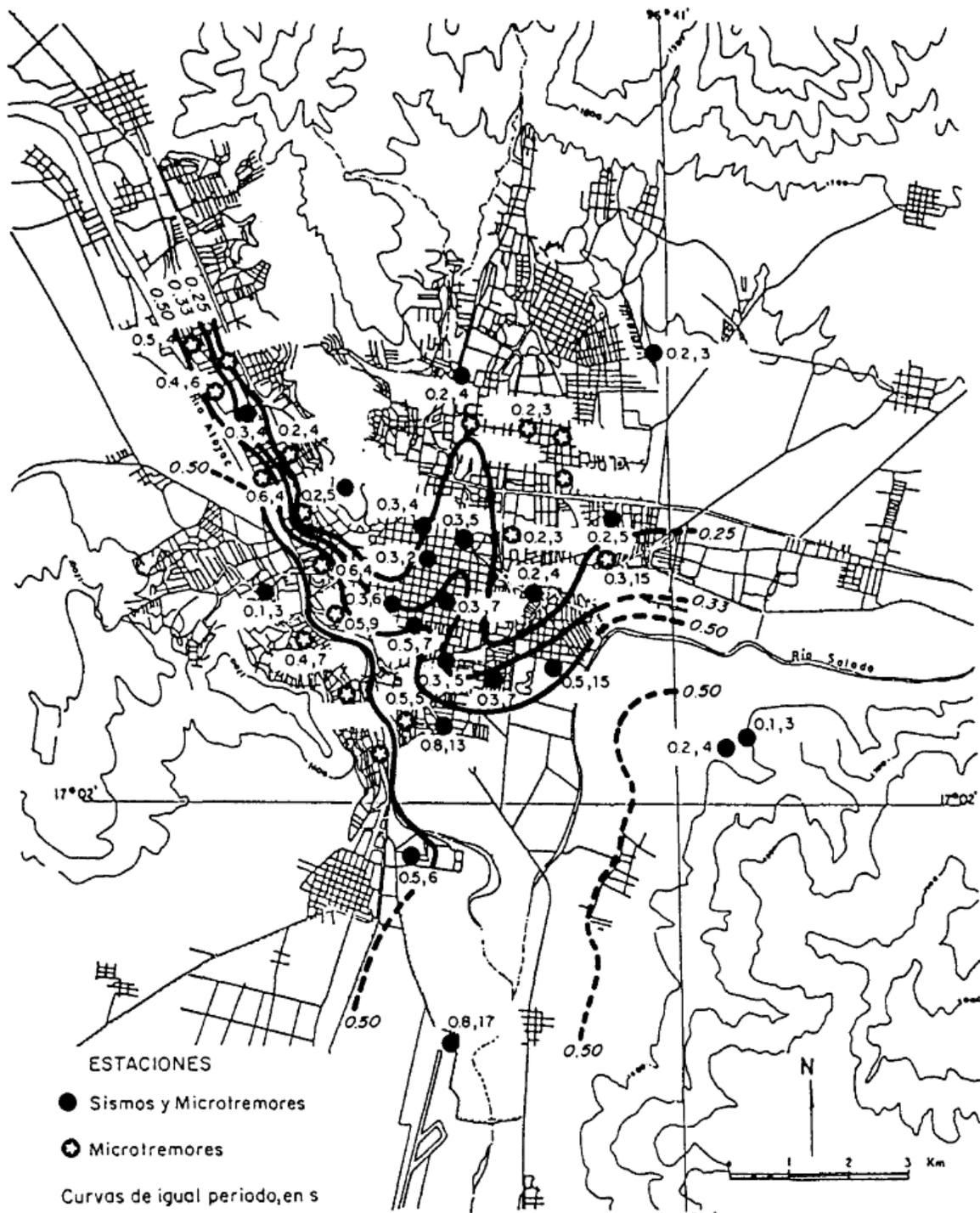


**Figura 3.16.** Función de transferencia teórica (FTT) para un sitio identificado en una de las zonas de estudio (Zona VI).

### Propuesta de microzonificación

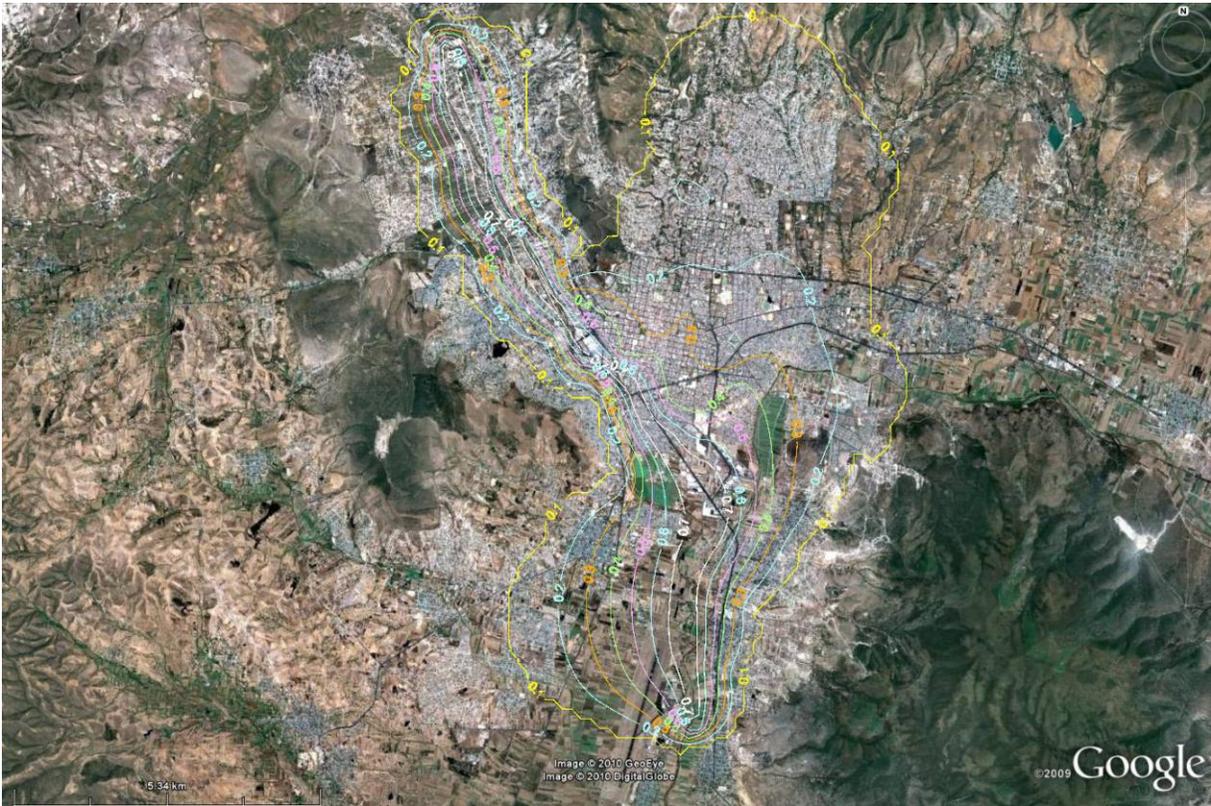
Con la información de las estaciones fue posible desarrollar un mapa de periodos del suelo el cual se usa para asignación de las diferentes funciones de amplificación que se obtuvieron con las FFT obtenidas en cada zona.

Un ejemplo de este tipo de mapas se muestra en el trabajo de Lermo *et al.* 1991 y se ilustra en la figura 3.17.



**Figura 3.17.** Mapa de periodos del suelo, Lermo *et al.*, 1991.

Con la información de indicada en los incisos anteriores y datos adicionales de vibración ambiental descritos en el apartado 2.2, se realizó una propuesta en la que se obtuvieron mapas de periodos del suelo para la ciudad de Oaxaca, en la figura 3.18 se muestra una versión actualizada de este mapa desarrollado con toda la información descrita en este capítulo y montado sobre una imagen satelital.



**Figura 3.18.** Mapa de periodos del suelo propuesto en este trabajo.

### **Reporte de mediciones de vibraciones ambientales en la costa de Oaxaca.**

Como ya se comentó, para determinar el peligro por sismo, es de vital importancia poder definir los efectos de amplificación de las ondas sísmicas. Para identificar zonas donde se puede presentar estas amplificaciones, personal de la empresa ERN, Ingenieros Consultores y del Departamento Técnico del Instituto Estatal de Protección Civil llevaron a cabo mediciones de vibraciones ambientales en diferentes puntos de la zona costera del estado, así como en ciertos puntos de la ciudad de Oaxaca.

Como resultado de lo anterior, paralelo a este documento, se elaboró el reporte titulado "ESTUDIO DE VIBRACIÓN AMBIENTAL PARA CONOCER LOS EFECTOS DE SITIO EN DIFERENTES LOCALIDADES DEL ESTADO DE OAXACA".

En el estudio realizado se localizaron y estudiaron zonas de alto riesgo sísmico, debido a su cercanía con las fuentes generadoras de movimientos fuertes y por su importancia turística o comercial; los sitios en estudio fueron los siguientes:

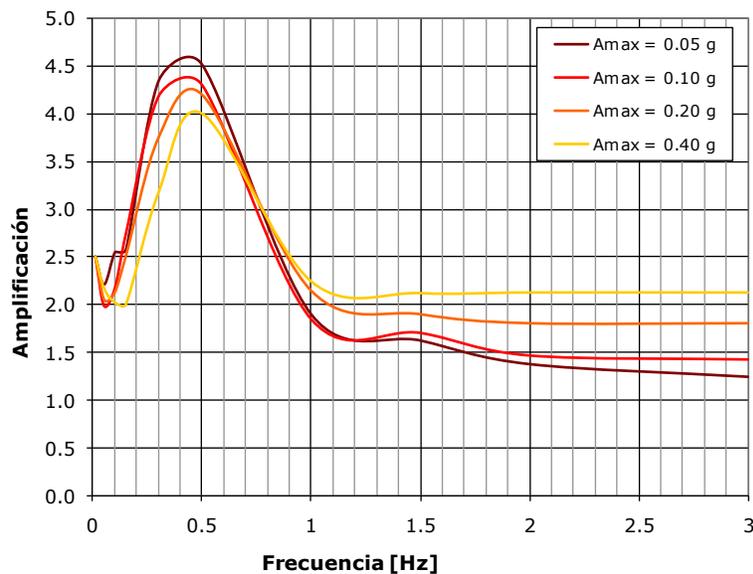
1. Pinotepa Nacional
2. Corralero
3. Puerto Escondido
4. Puerto Angel
5. Bahías de Huatulco
6. Ciudad de Oaxaca

De acuerdo con la zonificación sísmica propuesta por el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (MDOC-CFE-93), los sitios en estudio están ubicados en la Zona D que corresponde a la zona de mayor peligro sísmico, a excepción de la ciudad de Oaxaca que se ubica en la Zona C donde el peligro sísmico también es importante.

En el cuerpo principal del informe elaborado para tal fin, se presentan los procedimientos y los resultados de estimar los efectos de sitio, empleando análisis de los registros de vibración ambiental.

Como resultado de este trabajo de campo, se concluye que en algunos sitios de Pinotepa Nacional, no existe amplificación alguna o bien, ésta es considerablemente menor. Para el caso de Puerto Escondido, existe un punto en el que no se presentó amplificación y el caso más desfavorable, la amplificación fue de 2.66 veces. Para Puerto Ángel, por tratarse de una localidad considerablemente pequeña y montañosa, solamente se llevaron a cabo lecturas en cuatro sitios, de los cuales en uno de ellos no se detectó amplificación de ondas sísmicas y en la zona más desfavorable de esta localidad, la amplificación fue de 2.51. En las Bahías de Huatulco se detectó amplificación en los 8 sitios que se estudiaron, presentándose la máxima amplificación de ondas con un factor de 3.8. Para las zonas estudiadas de Salina Cruz se obtuvieron factores de amplificación de 5.11 y 6, valores considerablemente mayores a los obtenidos en las otras localidades estudiadas. Finalmente, para la ciudad de Oaxaca, en la campaña de mediciones realizadas en esta ocasión, el máximo valor de amplificación obtenido fue de 6.45, sin embargo, en estudios realizados anteriormente en otros sitios de la ciudad se obtuvieron valores del factor de amplificación hasta de 15.

Lo anterior indica que en la gran mayoría de los sitios estudiados, no existe una amplificación de ondas de importancia en caso de la ocurrencia de un sismo, esto excluye a las localidades de Salina Cruz y la ciudad de Oaxaca.



**Figura 3.19.** Función de amplificación espectral típica de un suelo blando.

A partir de la función de amplificación definida para el sitio de análisis, las aceleraciones espectrales a nivel de superficie  $Sa_{sup}$ , se calculan como:

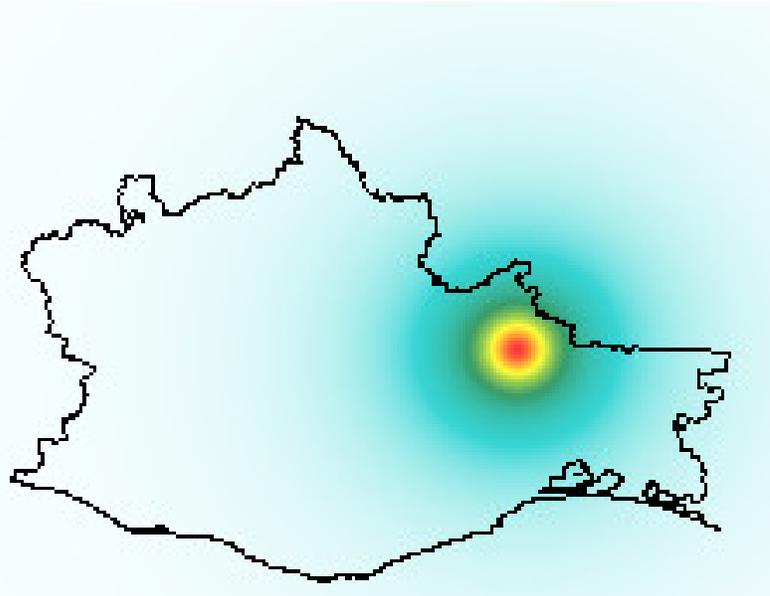
$$Sa_{sup} = A_{Amax} \cdot Sa_{tf} \quad (3.13)$$

donde  $A_{Amax}$  es el nivel de amplificación calculado para un para un valor de  $A_{max}$  (aceleración máxima del terreno firme) dado, y  $Sa_{tf}$  es la aceleración espectral calculada a nivel del terreno firme, empleando el modelo de amenaza sísmica.

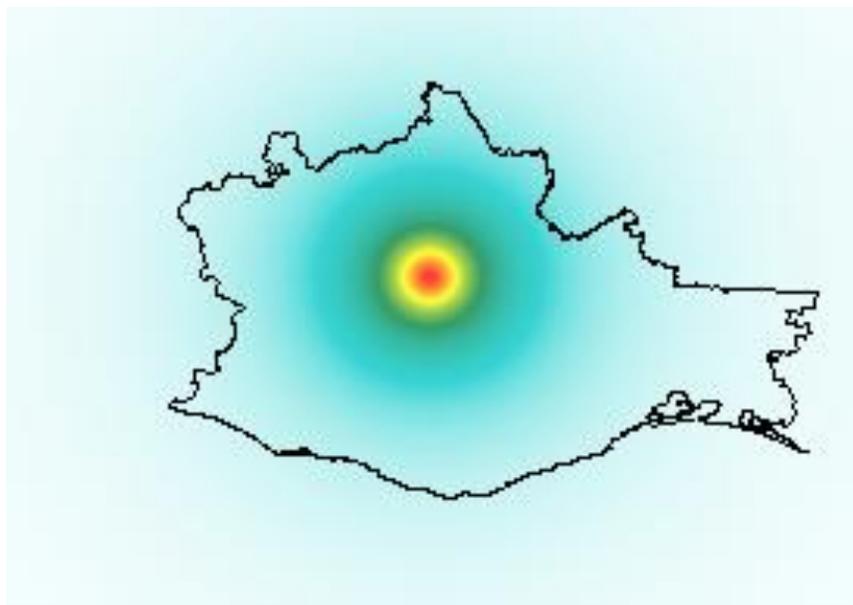
## Resultados obtenidos

### Estimación de escenarios estocásticos en roca

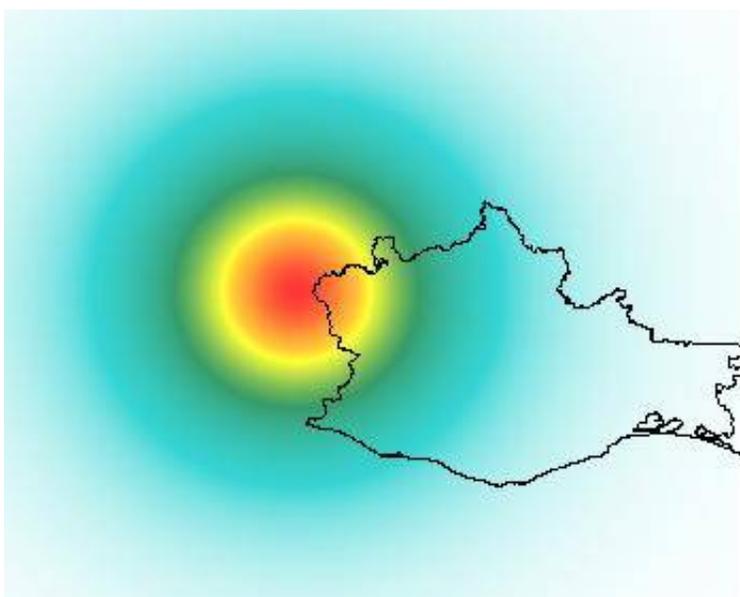
Como resultado de los parámetros mostrados anteriormente, se pueden obtener diferentes escenarios sísmicos que definirán el peligro sísmico. Ejemplo de dichos escenarios se muestran en las figuras 3.20 a 3.23, estos son para diferentes magnitudes y diferentes fuentes generadoras y sin considerar aún efectos de sitio. Además de lo anterior, es importante mencionar que debido a que se conocen los parámetros de excedencia de las magnitudes para cada una de las fuentes de interés, cada uno de los escenarios que se muestran en este documento, así como aquellos que se emplean para definir el riesgo por sismo, están asociados a una probabilidad de ocurrencia, dato importante al usar un método de estimación probabilista.



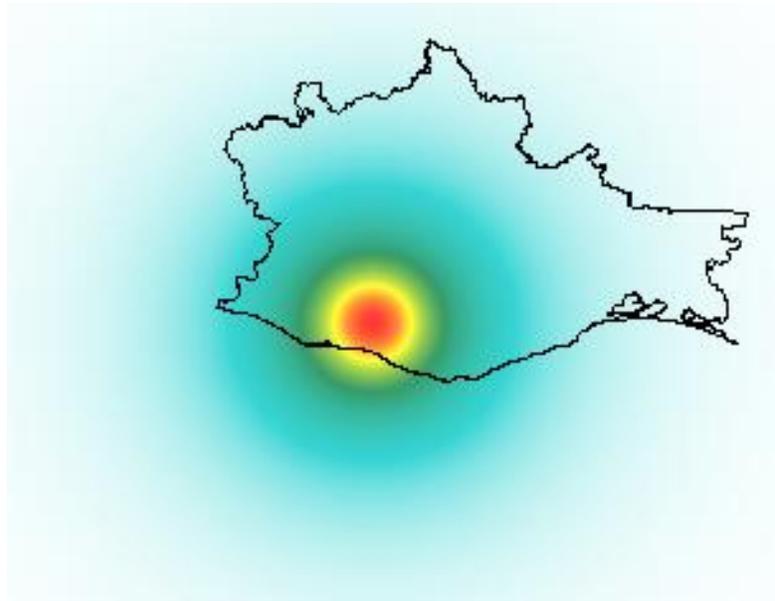
**Figura 3.20.** Sismo intraplaca superficial simulado con magnitud de 5.2.



**Figura 3.21.** Sismo intraplaca superficial simulado con magnitud de 6.8.



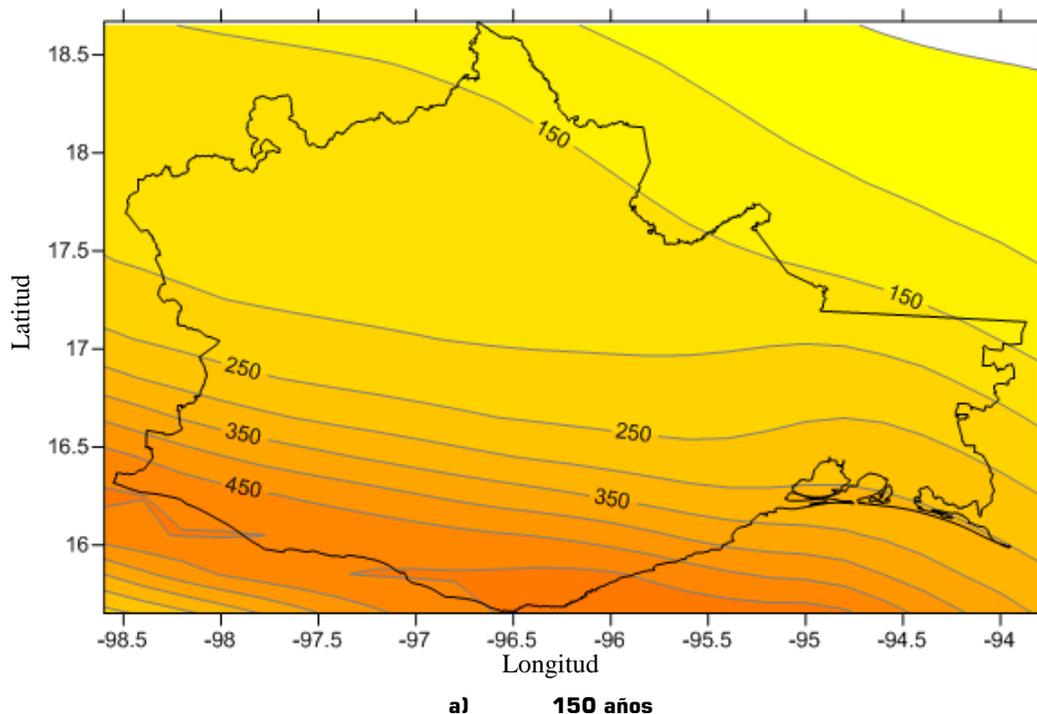
**Figura 3.22.** Sismo intraplaca de profundidad intermedia simulado con magnitud de 7.1.

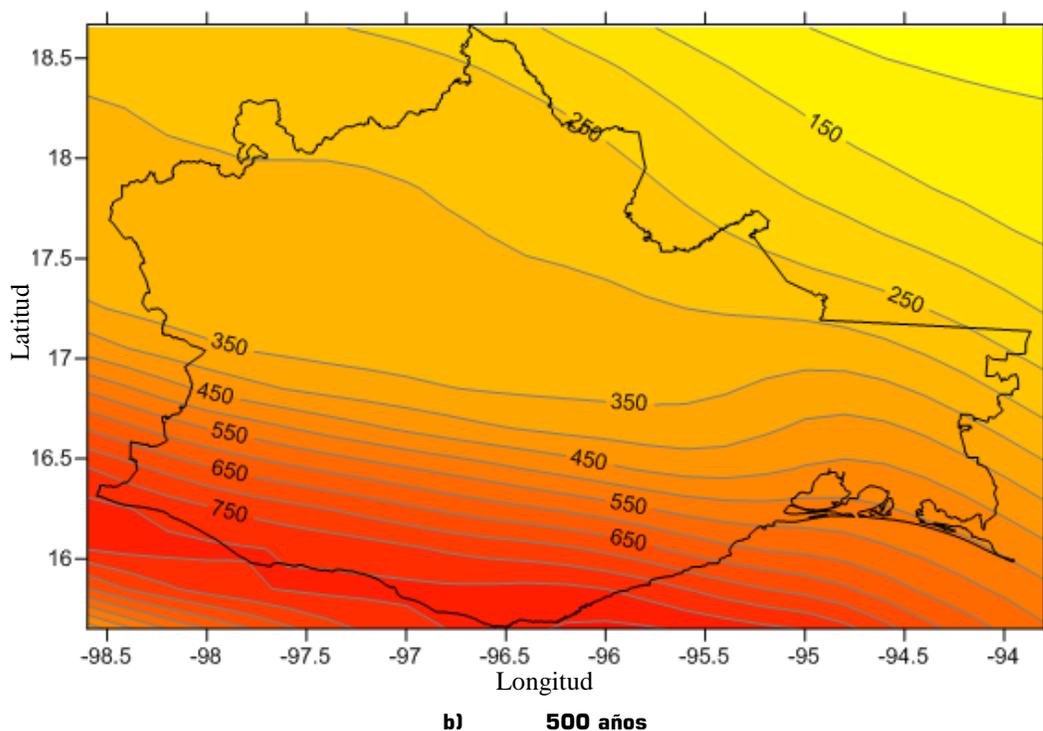


**Figura 3.23.** Sismo de subducción simulado con magnitud de 8.2

### Estimación de amenaza probabilista en roca

Además de escenarios específicos como los mostrados en la sección anterior, una vez conocidas las fuentes sísmicas y las leyes de atenuación, se pueden obtener los mapas de amenaza al aplicar la ecuación 3.12. Los resultados obtenidos se expresan por medio de intensidad como la Aceleración Máxima del Terreno ( $A_{m\acute{a}x}$ ) o Aceleraciones espectrales, ambas para diferentes periodos de retorno. La figura 3.24 muestra dos de estos mapas para los periodos de retorno de 150 y 500 años.





**Figura 3.24.** Aceleraciones máximas del terreno, en el territorio oaxaqueño, para diferentes periodos de retorno.

Esta información ejemplifica los resultados que se obtienen de definir el peligro sísmico, con ella, se está en posibilidades de definir diferentes escenarios en Magnitud, localización (fuente) y periodo de recurrencia. Esta información, junto con los resultados que se obtengan del estudio de efectos de sitio, se implementará en la página web y se utilizarán en el desarrollo de los análisis para la estimación de pérdidas físicas.

### 3.2 Amenaza por tsunami

#### Introducción

La modelación de tsunami debe abordarse por medio de dos análisis complementarios: i) generación, y ii) propagación y arribo. Los análisis de generación permiten estimar la energía que un evento detonante es capaz de transmitir a la masa de agua en forma de ondas gravitacionales. Este análisis involucra un importante conocimiento del proceso detonante y la capacidad de establecer o adoptar modelos de comportamiento dentro de las condiciones esperadas para el área bajo estudio, así como la necesidad de establecer o adoptar modelos de interacción entre el suceso detonante y la masa de agua.

Los análisis de propagación y arribo requieren de la aplicación de una teoría hidrodinámica que permita establecer las condiciones de propagación de las ondas gravitacionales en el agua, así como determinar las condiciones de arribo, amplificaciones por efectos locales particulares y la capacidad de afectar en sitios poblados determinados o componentes de infraestructura importantes.

## Hidrodinámica de los tsunamis

Con el fin de poder establecer las condiciones mediante las que se desarrolla la amenaza por tsunami, es necesario conocer las características físicas del desplazamiento del agua que inducen los sismos, y que proveen la mejor descripción, tanto de su tamaño como de la capacidad destructiva. Una descripción analítica detallada se encuentra en Satake (2002) y Helal & Mehanna (2008).

### Ondas largas

Se considera un sistema de coordenadas con el origen a nivel de la superficie de agua en reposo. Las condiciones geométricas se presentan en la Figura 3.25, para una onda con velocidad de propagación  $V$  (vector con componentes  $u$  y  $w$  en  $x$  y  $z$  respectivamente) (Satake, 2002). A este tipo de ondas se les conoce también como gravitacionales, dado que la gravedad es la que controla el mecanismo de restauración del medio.

$$\frac{D\bar{V}}{Dt} = -\bar{g} - \frac{1}{\rho}\nabla p \quad (3.14)$$

donde

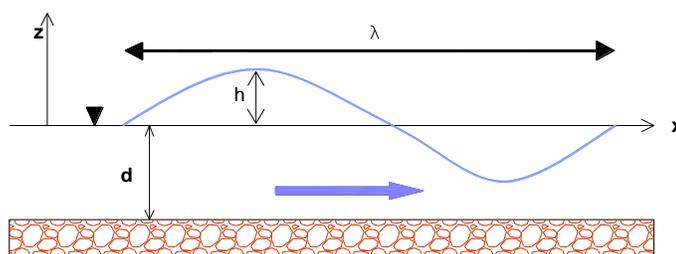
$$D/Dt \text{ indica la derivada total representada por: } \frac{D\bar{V}}{Dt} = \frac{\partial\bar{V}}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla\bar{V}$$

$\nabla\bar{V}$  = Gradiente de velocidades.

$\bar{g}$  = Vector en tres componentes de aceleración gravitacional

$\rho$  = Densidad del medio de propagación

$\nabla p$  = Gradiente de presión.



**Figura 3.25.** Condiciones geométricas de las ondas largas.

En el caso de que la longitud de onda  $\lambda$  sea mucho mayor que la profundidad del medio ( $\lambda \gg d$ ), la aceleración vertical resultante en el agua es despreciable, en comparación con la gravedad. Esto implica que el movimiento de la masa de agua, en dirección horizontal, es prácticamente constante desde el fondo hasta la superficie. A este tipo de ondas se les conoce como ondas largas, u ondas en aguas someras (shallow-water waves). Para el caso de los tsunamis, la profundidad de los océanos se encuentra típicamente alrededor de los 5 km, mientras que la longitud del frente de ondas puede ser de varios cientos de kilómetros. Por este motivo, la aproximación de onda larga es suficientemente válida para caracterizar el tránsito de la energía del tsunami en mar abierto.

La componente de movimiento horizontal de la Ecuación 3.15 se puede escribir como sigue, al remplazar el gradiente de presiones por la pendiente de la superficie del agua.

$$\frac{Du}{Dt} = -g \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3.15)$$

En el caso de los tsunamis, el término de no linealidad es normalmente pequeño y puede ser despreciado ( $Du/Dt \approx \partial u/\partial t$ ), por lo que la ecuación de movimiento se convierte en

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3.16)$$

En el caso particular en que la amplitud vertical del movimiento es muy pequeña, en comparación con la profundidad del agua ( $d \gg h$ ), la ecuación de continuidad puede escribirse como

$$\frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \quad (3.17)$$

donde  $c = \sqrt{gd}$ , corresponde a la velocidad de propagación de la onda.

### Ecuaciones de onda larga

Al incluir el efecto de la rugosidad del fondo oceánico, así como el efecto de Coriolis generado por la rotación terrestre, las ecuaciones del movimiento de la onda larga, para el caso tridimensional, pueden escribirse de la siguiente manera (Satake, 2002)

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} &= -fV - g \frac{\partial h}{\partial x} - C_f \frac{U\sqrt{U^2 + V^2}}{d+h} \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} &= -fU - g \frac{\partial h}{\partial y} - C_f \frac{V\sqrt{U^2 + V^2}}{d+h} \end{aligned} \quad (3.18)$$

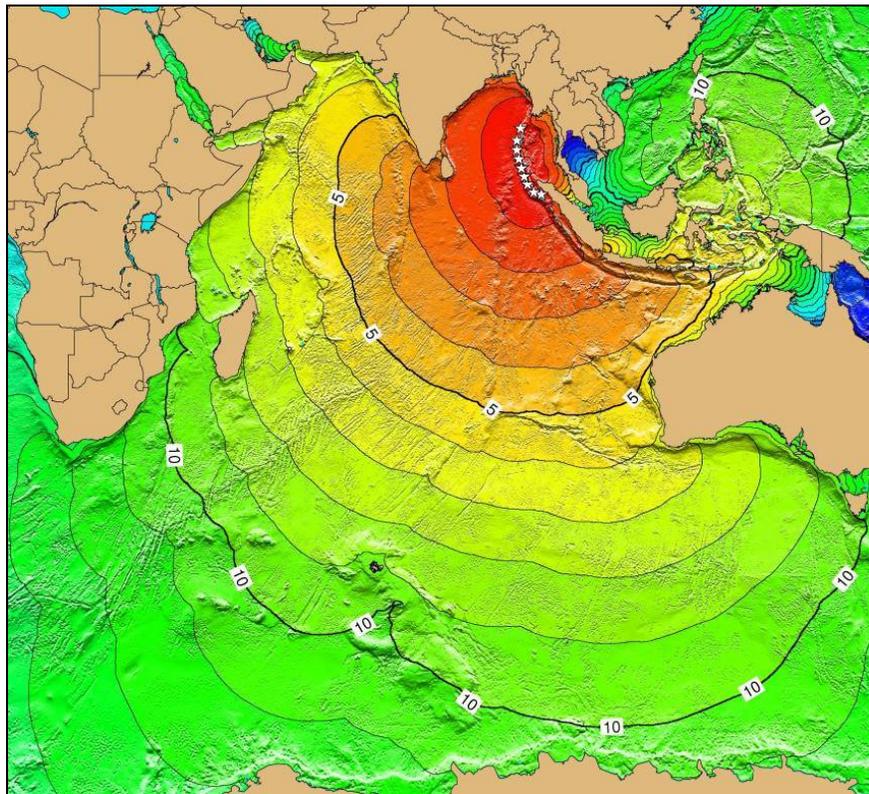
Junto con la ecuación de continuidad

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(U(h+d)) + \frac{\partial}{\partial y}(V(h+d)) = 0 \quad (3.19)$$

donde  $f$  es el parámetro de Coriolis,  $C_f$  es un coeficiente adimensional de fricción,  $U$  y  $V$  son las velocidades promedio en las direcciones  $x$  y  $y$  respectivamente. Empleando las relaciones anteriores, es posible modelar el comportamiento de las ondas que genera un tsunami, en el sentido de predecir sus condiciones de propagación y arribo.

### Propagación de ondas

Al suponer que el comportamiento hidrodinámico de los Tsunami se basa en la teoría de ondas largas, es posible emplear la teoría geométrica de propagación óptica de rayos para determinar aproximadamente el tiempo que le toma al frente de ondas arribar a un destino específico. Con los mapas de refracción de ondas, se presentan los contornos de igual tiempo de arribo. En el cálculo de estos mapas se considera únicamente la condición de refracción de ondas, despreciando el efecto de reflexión, dado que no se trata de un mapa de amplitudes o amplificaciones de onda. La Figura 3.26 presenta un mapa de refracción de ondas para el tsunami de Indonesia del 26 de diciembre de 2004.



**Figura 3.26.** Diagrama de refracción de ondas, con contornos de tiempo de arribo. Tsunami de Indonesia, 26 de Diciembre de 2004  
 (Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration).

### Ley de Green

Un análisis de conservación de la energía a lo largo de uno de los rayos del mapa de refracción, permite establecer condiciones de aproximación de los valores propios de la onda generada por el tsunami, obteniéndose del análisis la siguiente expresión:

$$b_{i-1} \frac{\sqrt{d_{i-1}}}{h_{i-1}^2} = b_i \frac{\sqrt{d_i}}{h_i^2} \quad (3.20)$$

donde  $b$  es la distancia entre rayos,  $d$  es la profundidad del agua, y  $h$  es la amplitud del tsunami (amplitud del agua contada desde el nivel de reposo). Los subíndices  $i-1$  e  $i$ , representan dos estados inmediatos de análisis. Si se conoce la amplitud del tsunami en un estado inicial determinado, junto con las características oceánicas y de propagación de la onda, es posible estimar la amplitud en el estado siguiente por medio de la siguiente expresión.

$$h_i = h_{i-1} \left( \frac{b_{i-1}}{b_i} \right)^{1/2} \left( \frac{d_{i-1}}{d_i} \right)^{1/4} \quad (3.21)$$

Esta relación se conoce como Ley de Green. Es una relación general de propagación de ondas en medios someros, la cual puede ser aplicada para el caso de los tsunamis. La relación representa la dispersión de los rayos a medida que se propaga la onda. Los rayos se distribuyen de manera perpendicular a los contornos del frente de onda (Figura 3.26), con origen común en el epicentro sísmico o la fuente generadora.

## Modelo analítico alternativos

### Generalidades

La actividad sísmica en regiones oceánicas induce la existencia de una importante amenaza por eventos tsunamigénicos. El desplazamiento constante de las placas tectónicas y su interacción en las zonas de subducción, hace que la amenaza por tsunami se manifieste de manera recurrente, con la misma frecuencia o probabilidad que los eventos sísmicos detonantes.

El nivel de impacto que es capaz de producir un tsunami está asociado con el tamaño y profundidad del terremoto, la velocidad de propagación de las ondas en el agua y la altura de la ola al momento de su llegada a la costa. Los modelos sísmicos e hidrodinámicos permiten establecer aproximaciones sobre las características que podrían presentar los tsunamis futuros, para diferentes períodos de recurrencia.

### Selección

La modelación hidrodinámica detallada del tránsito de las ondas gravitacionales en mares y océanos requiere de información con alto nivel de detalle que en el momento no se encuentra disponible para la región. La caracterización adecuada de los desplazamientos cosísmicos del lecho marino, los cuales determinan la magnitud del evento de tsunami, requiere de la utilización de modelos sismológicos complejos, cuya aplicación se ve restringida dado el relativamente pobre conocimiento que se tiene del fenómeno de ruptura en la zona de subducción, durante terremotos de magnitud alta. Así mismo la información batimétrica detallada para la totalidad de la costa del Oaxaca, no se encuentra disponible, y su levantamiento requiere de grandes esfuerzos y desarrollos tecnológicos.

Por lo tanto se selecciona dos tipos de modelos alternativos: Uno paramétrico simplificado y otro con funciones de Green.

### Descripción del modelo paramétrico

Debido a lo poco práctico que resultaría modelar escenarios de Tsunami con los métodos de generación y propagación de ondas tradicionales se recurrió a un método paramétrico el cual simplifica el proceso de modelación con tiempos de cálculo razonables aunque con mayor incertidumbre en los resultados, por las características probabilistas del proyecto este método paramétrico se consideró aceptable.

El método paramétrico está basado en los trabajos de Okal y Synolakis (2004) donde de acuerdo a observaciones de altura máxima en varios eventos de tsunami importantes, proponen una expresión que ajusta de manera aproximada a las mediciones a lo largo de la costa de afectación. La expresión es la siguiente:

$$\zeta(y) = \frac{b}{\left[\frac{y}{a}\right]^2 + 1} \quad (3.22)$$

Donde  $\zeta(y)$  es la altura de ola,  $y$  es la distancia de la costa, y  $a$  y  $b$  son factores que se obtienen de acuerdo a las características del temblor. El parámetro  $b$  tiene que ver con la altura máxima de ola y el parámetro  $a$  con la distribución de alturas en la costa.

De acuerdo a los análisis con varios tsunamis producidos por sismos de fuente cercana, Okal y Synolakis (2004) proponen valores de dichos parámetros

Un valor adicional que está relacionado con los parámetros  $a$  y  $b$  es el dato  $I_2$  definido como:

$$I_2 = \frac{b}{a} \quad (3.23)$$

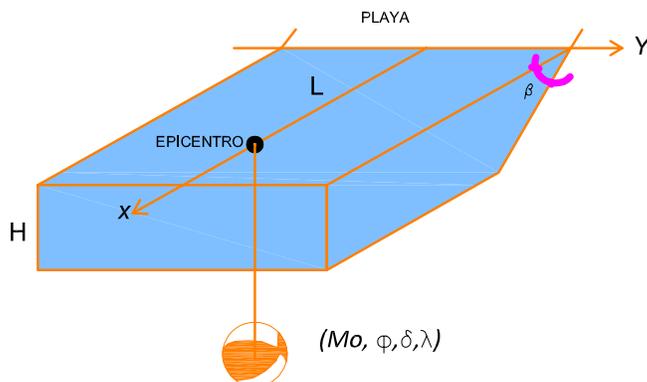
Las expresiones para obtener los parámetros indicados son resultado de un proceso de ajuste de eventos ocurridos en las costas mexicanas

#### *Consideraciones*

La manera de generar las variables de las ecuaciones empleadas es mediante un modelo de amenaza de sismo con el que se obtienen una lista de eventos, la magnitud de los mismos y las coordenadas del hipocentro. Como consideraciones adicionales se supone que los sismos generan tsunamis solo sí:

- a. Tienen epicentros localizados en el mar
- b. Tienen magnitudes mayores a 6 grados
- c. La profundidad del hipocentro es menor a 60 Km
- d. La distancia máxima de afectación es de 600 Km

En la Figura 3.27 se ilustran algunas de las variables empleadas.

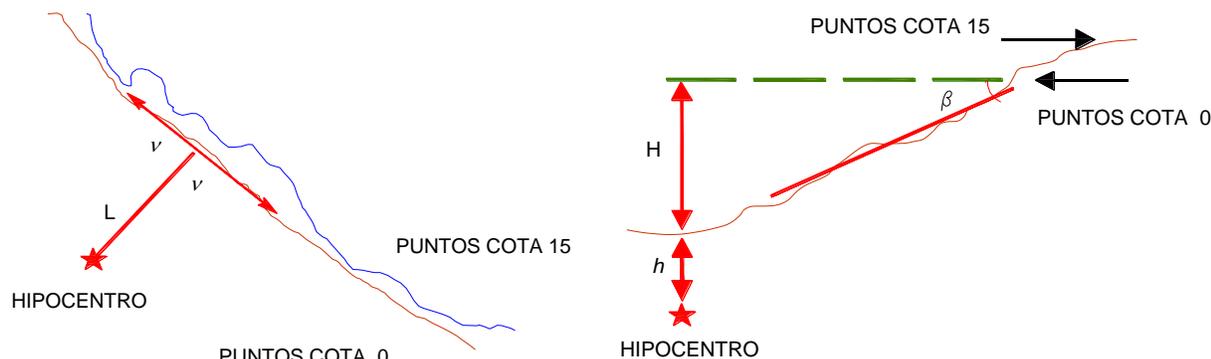


**Figura 3.27.** Esquema ilustrativo de las variables que intervienen en el método paramétrico.

Adicionalmente se hace uso de puntos de cálculo definidos por el usuario. Estos puntos indican la región donde nos interesa conocer las áreas de inundación por tsunami y están definidos de la siguiente manera:

1. Las coordenadas de la línea de costa (Cota 0).
2. Puntos en tierra con una elevación aproximada de 15 metros (Cota 15). El objetivo de estos puntos es realizar los cálculos de altura de inundación hasta las posiciones de los mismos.

Para el método es importante que cada punto de la costa tenga un correspondiente punto de tierra y que las rectas que se obtienen con estos puntos no se crucen. En la Figura 3.28 se muestra un esquema con la definición de estos puntos y algunas consideraciones para la aplicación del método.



**Figura 3.28.** Ejemplo de consideraciones para la aplicación del método paramétrico.

### Descripción del modelo con funciones de Green

En los últimos diez años el progreso en los métodos de procesamiento e interpretación de los registros de nivel del mar ha permitido ampliar la gama de aplicaciones importantes de esta información. La modelación avanzada de los registros de tsunamis generados por sismos que ocurrieron entre la costa occidental de México y la trinchera Mesoamericana nos ha permitido emplear el método inverso para la determinación de áreas de ruptura de dislocaciones cosísmicas y la determinación de desplazamientos verticales de la costa (Ortiz *et al.*, 2000a, b). Estos resultados son importantes porque demuestran la relación funcional

entre la altura del tsunami y la estimación de los parámetros de la fuente sísmica. Por ejemplo, la modelación tanto de la dislocación cosísmica como de los tsunamis asociados con los sismos de 1962 en Acapulco nos permitió relocalizar y determinar la extensión y magnitud ( $M_w = 7$ ) de estos eventos que son muy importantes para la estimación de riesgo sísmico en México. Los datos de los mareógrafos ubicados a decenas de kilómetros del área de la ruptura sísmica no han registrado directamente el desplazamiento cortical, sin embargo, los tsunamis registrados han sido extremadamente útiles para la estimación de la localización y extensión del área de ruptura, como en el caso del terremoto de 1957 ( $M_w 7.8$ ) en la costa Chica de Guerrero (Ortiz *et al.*, 2000a) y del terremoto de 1881 ( $M_w 7.1$ ) en el golfo de Bengala (Ortiz y Bilham, 2003). La relación funcional entre la altura del tsunami y la estimación de los parámetros de la fuente sísmica ha permitido a su vez el empleo satisfactorio de funciones de Green con fines de investigación para caracterizar la fuente sísmica en función de observaciones costeras de tsunami y de una segmentación adecuada del plano de falla (Satake, 1987; Ortiz y Bilham, 2003; Singh *et al.*, 2006). Los resultados satisfactorios de los métodos inversos nos dan la confianza para estimar la altura esperada de tsunamis empleando a la inversa los métodos inversos, es decir, empleando de manera directa la superposición de funciones de Green generadas por una segmentación adecuada del plano de falla.

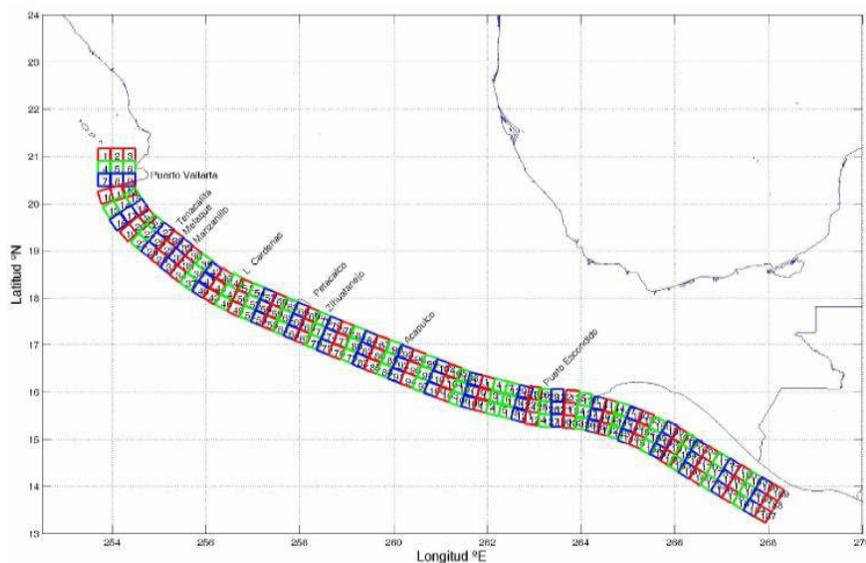
#### *Segmentación de áreas de ruptura*

La historia de la sismicidad en México indica que los sismos ( $M_w > 7$ ) con potencial tsunamigénico para la costa occidental de México son los que ocurren en la zona de contacto interplaca localizada entre la costa y la Trinchera Mesoamericana. A ello obedece la localización y segmentación de áreas de ruptura en mosaicos de  $30 \times 30 \text{ km}^2$  (Figura 3.29) empleados en este estudio para simular dislocaciones cosísmicas tsunamigénicas. El área de ruptura de cada uno de estos segmentos correspondería a un sismo de magnitud  $M_w=7$  de acuerdo con la relación  $M_w = \log_{10}(A) + 4.0$  (Utsu and Seki, 1954; Wyss, 1979; Singh *et al.*, 1980), en donde  $A$  representa el área en  $\text{km}^2$ . El momento sísmico ( $M_{oi}$ ) de cada uno de los segmentos  $i$  puede variar haciendo variar la magnitud de la dislocación ( $d_i$ ) de acuerdo con la relación:  $M_{oi} = \mu A d_i$ ; en donde  $\mu$  representa el módulo de rigidez. En este caso la magnitud de una dislocación compuesta por  $n$  diferentes segmentos se puede estimar con la ecuación (Hanks and Kanamori, 1979):

$$M_w = 2/3 \log_{10} \left( \sum_{i=1}^n M_{oi} \right) - 10.7 \quad (3.24)$$

Por ejemplo, en una dislocación homogénea de 4 metros en 6 segmentos consecutivos:

$$\sum_{i=1}^4 M_{oi} = 1.08e28 \text{ dina-cm}; M_w = 7.98; \text{ considerando } \mu = 5 \times 10^{11} \text{ dina cm}^{-2}.$$

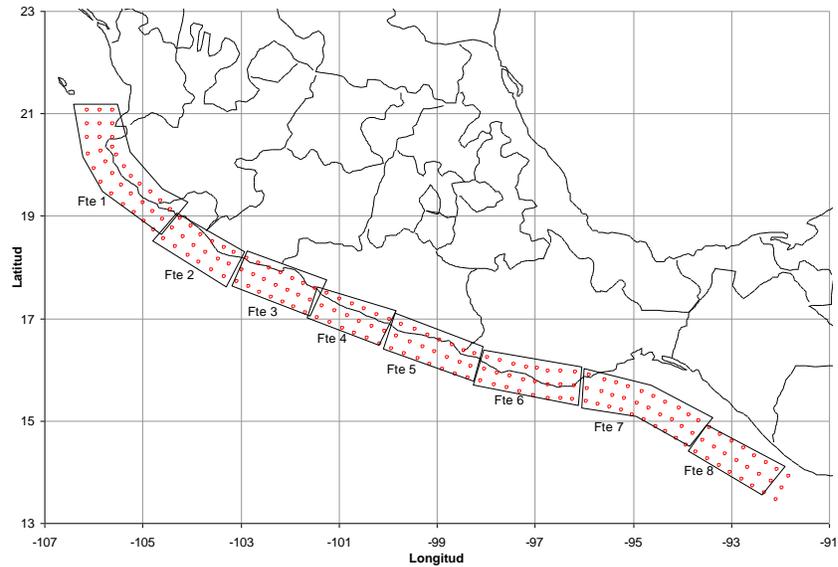


**Figura 3.29.** Segmentación de áreas de ruptura en 189 mosaicos de 30x30 km<sup>2</sup> localizados en la interplaca entre la costa y la Trinchera Mesoamericana. La proyección superficial de los segmentos más cercanos a la Trinchera se hizo coincidir con la isóbata de 4000 metros.

La deformación vertical cosísmica del lecho marino producto de una dislocación homogénea en cada uno de los segmentos se calculó con el modelo de Mansinha y Smylie (1971) representado por la ecuación 2.3 En todos los segmentos se consideró un mecanismo focal puramente inverso con dislocación de un metro. La proyección superficial del extremo suroeste de los segmentos más cercanos a la Trinchera se hizo coincidir con la isóbata de 4000 metros. En estos segmentos se prescribió una profundidad de 5 km y un echado de 10 grados. En los segmentos intermedios, entre la trinchera y la costa, la profundidad es de 10 km y el echado de 15 grados, y en los segmentos más cercanos a la costa se prescribió una profundidad de 17 km y un echado de 16 grados. La profundidad que se indica corresponde al lado más somero o menos profundo de los segmentos.

#### Modelo de riesgo

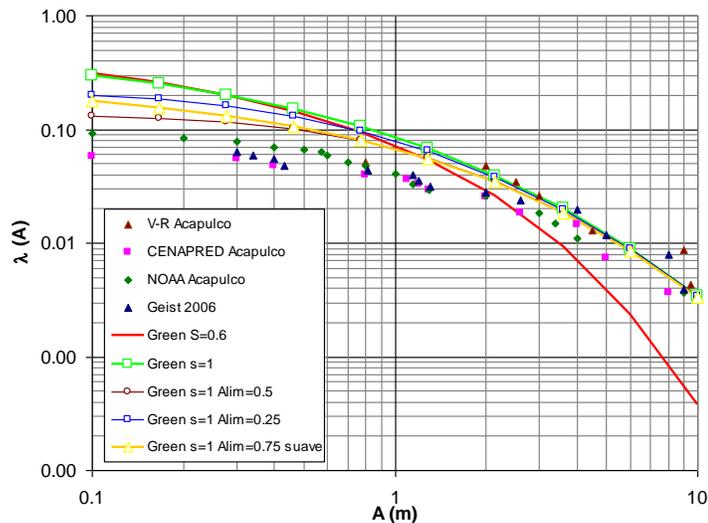
Para estimar la altura de ola por tsunami en la costa oaxaqueña se dividió la zona de generación (el total de las celdas de 30x30 km<sup>2</sup>) en 8 fuentes sísmicas generadoras de maremotos, las cuales coinciden con los grandes temblores de subducción en México ( $M_s \geq 7.0$ ) a lo largo de la costa del Pacífico. En Figura 3.30 se muestran las fuentes sísmicas generadoras de estos sismos. Cada una de estas fuentes genera temblores a una tasa constante, la tasa de excedencia de magnitudes de cada fuente mide qué tan frecuentemente se generan en una fuente temblores con magnitud superior a una dada.



**Figura 3.30.** Centroides de las celdas de 30x30 km<sup>2</sup> y las 8 fuentes generadoras de Tsunami.

En cada una de estas ocho fuentes se contemplaron los escenarios que se pueden calcular de acuerdo a las combinaciones de arreglos de celdas de 30x30 km<sup>2</sup> en cada fuente, como resultado obtuvimos un total de 603 escenarios.

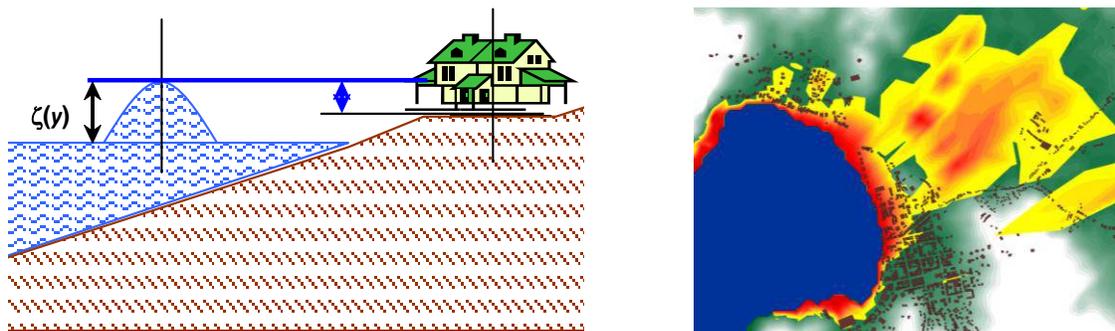
Para cada uno de los 603 escenarios se precalcularon las alturas máximas en algunos puntos de interés. Ya que cada escenario tiene asignada una frecuencia podemos crear un catálogo simulado de alturas de ola máximas para cada localidad analizada, para calibrar y corroborar nuestros resultados usamos la información histórica disponible en la bahía de Acapulco que es el sitio donde se cuenta con mayores observaciones de Tsunamis. Un ejemplo de las comparaciones de los resultados obtenidos con el modelo y lo observado se muestra en la Figura 3.31 donde se calibró el modelo para diferentes parámetros límite (Alim) y diferentes dispersiones de altura de ola (s), en esta gráfica se muestra con puntos la información de *CENAPRED* así como de otros autores.



**Figura 3.31.** Ejemplo de la calibración del peligro de tsunami en la bahía de Acapulco.

### Obtención de zonas de inundación

Una vez que se tiene la altura de ola  $\zeta(y)$  para cada punto de cálculo, se pueden obtener las zonas de inundación en la región de interés. La estimación de las zonas de inundación se obtienen por la diferencia de la altura de ola  $\zeta(y)$  y la elevación del terreno obtenida con topografía detallada. En la Figura 3.32 se esquematiza este análisis.



**Figura 3.32.** Esquema de estimación de alturas de inundación y resultados de áreas de inundación.

### Generación

Los sismos que detonen un tsunami serán aquellos que induzcan un levantamiento significativo del lecho marino. Los tsunamis están directamente asociados a la actividad tectónica de la zona de subducción del pacífico oaxaqueño. Las condiciones propias de esta zona de interacción de placas, implican el potencial de generación de sismos altamente destructivos, de magnitudes mayores a 7.

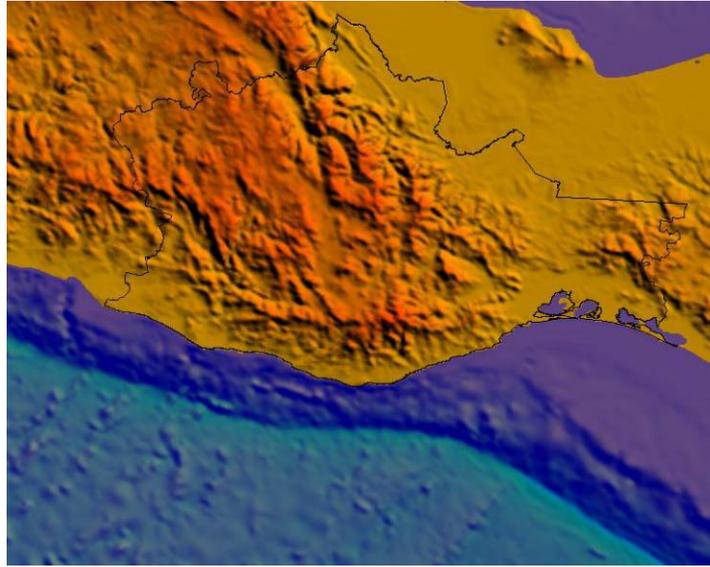
Para este punto se simulan sismos en las fuentes de subducción indicadas en la sección de sismo anterior correspondientes a la figura 3.32.

### Información usada en la modelación

El impacto de un tsunami particular depende en gran medida de las condiciones batimétricas y topográficas locales, así como de la localización exacta de la población o infraestructura expuesta con relación a la costa, y su vulnerabilidad a este tipo de amenaza.

La batimetría y topografía costera definen la manera como se verá amplificada la amplitud de la ola, o Run-up, con el fin de calcular las condiciones particulares de impacto del tsunami.

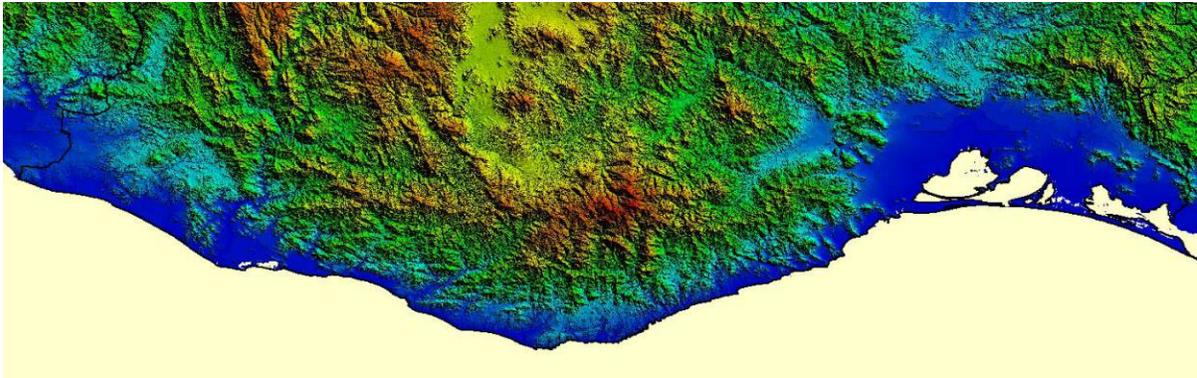
Se empleó un modelo digital de batimetría con una resolución de 1 minuto, lo cual corresponde a un tamaño de píxel de 1.8 kilómetros. La información se obtuvo de la base de datos ETOPO1 Global Relief Model (2009), de la agencia estadounidense NOAA. La Figura 3.33 presenta el modelo digital de elevación empleado para la batimetría.



**Figura 3.33.** Imagen de la batimetría empleada para el modelo de tsunami.

Se empleó un modelo digital de topografía con una resolución de 30 metros. La información se obtuvo de la base de datos ASTER Global Digital Elevation Model (2009), de la agencia estadounidense NASA. La

Figura **3.34.** presenta el modelo digital de elevación empleado para la topografía.



**Figura 3.34.** Imagen de la topografía empleada para el modelo de tsunami.

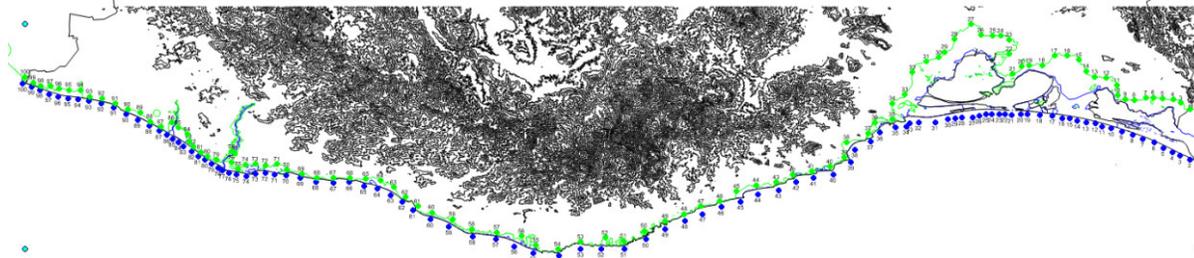
### **Parámetros del Modelo**

Con el fin de automatizar el proceso de cálculo, fue necesario precalcular las alturas de ola debido a cada uno de los escenarios. Se consideró la zona de subducción del Pacífico como única fuente generadora de tsunamis.

El modelo considera la presencia de un número suficiente de sismos con magnitudes de 6 a 7.5 grados los cuales representan sismos históricos y postulados obtenidos con el modelo de amenaza sísmica. Las frecuencias de recurrencia de cada escenario se asignan de acuerdo a la actividad sísmica de la región.

Se eligieron 100 puntos sobre la costa oaxaqueña para estimar las alturas máximas de tsunamis, la ubicación de estos puntos se muestra en la Figura 3.37 Para simular

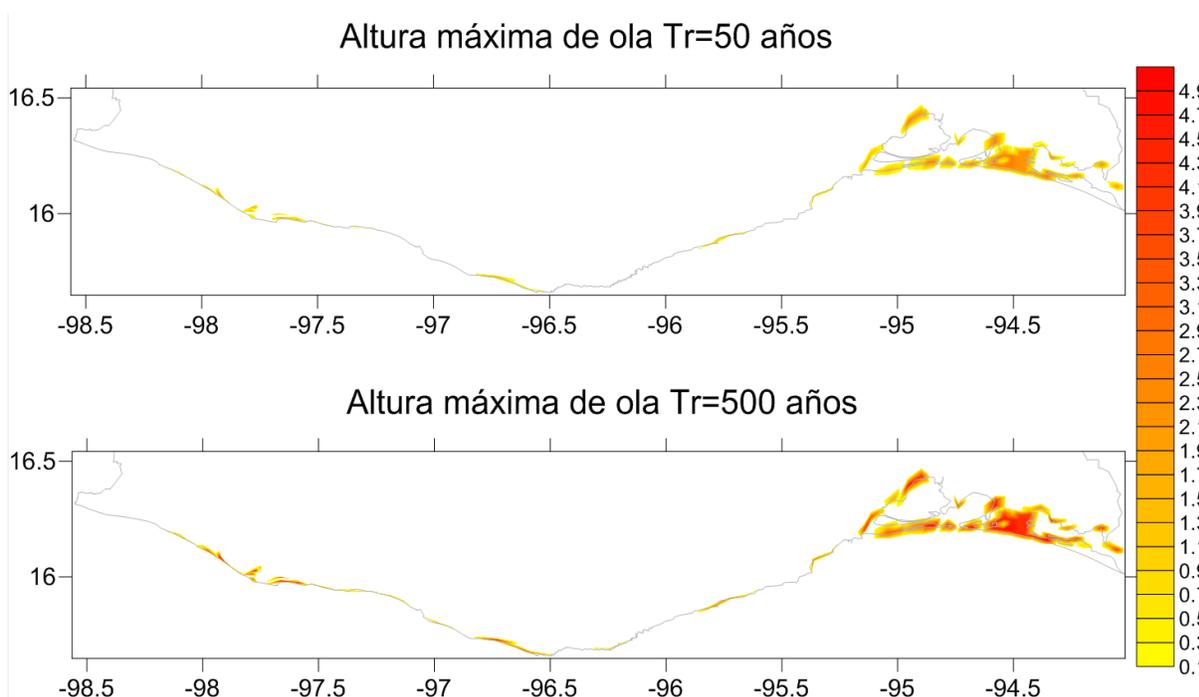
adecuadamente la altura del tsunami en la costa y su penetración tierra adentro, se requiere emplear un procedimiento aproximado a partir de la isóbata 100, el cual consiste en aplicar un factor de amplificación al tsunami aguas adentro para calcular la altura del tsunami al aproximarse a la costa. Este factor debe ingresarse junto con la lista de puntos de cálculo.



**Figura 3.35.** Puntos de cálculo para tsunami.

### Mapas de Amenaza

Para la elaboración de los mapas se empleó la información mencionada anteriormente, y se asignó la frecuencia de ocurrencia de los diferentes escenarios, de acuerdo con la sismicidad propia de las fuentes generadoras. Se calcularon mapas de amenaza uniforme por tsunami, tomando como medida de intensidad, el tirante de inundación, según lo explicado anteriormente para periodos de retorno de 50, 500 años.



**Figura 3.36.** Mapa de amenaza de inundación por tsunami [m] para 50 y 500 años de periodo de retorno.

### 3.3 Amenaza por marejada

#### Modelo analítico propuesto

##### Generalidades

La energía de las olas puede converger hacia regiones determinadas por lo que la probabilidad de encontrar olas grandes es mucho mayor en estas zonas que en otras. Este tipo de refracción y difracción de las olas puede ser calculado, tanto si son provocadas por corrientes como por la batimetría. Por tanto, se pueden predecir de alguna manera, olas de este tipo. Estudios en el tema han mostrado que un tren de olas en su conjunto es levemente no lineal y tiene una anchura de banda relativamente pequeña (Dysthe, 2001). Esto justifica el uso de ecuaciones no lineales como la de Schrödinger como modelos matemáticos simplificados para la descripción de estas olas (Dysthe y Trulsen, 2001).

##### Ecuación no lineal modificada de Schrödinger

Partiendo de la ecuación de flujo potencial, normalizada por el número de ondas  $k_c$  y frecuencia  $\omega_c$  característicos, y considerando una profundidad constante  $h$  mucho mayor que la longitud de onda  $k_c h \gg 1$ , se asume que la velocidad potencial  $\phi$  y el desplazamiento en la superficie  $\zeta$  de un conjunto de olas se puede expresar a través de expansiones armónicas como

$$\phi = \bar{\phi} + \frac{1}{2} \left( A e^{i(x-t)+z} + A_2 e^{2i(x-t)+2z} + A_3 e^{3i(x-t)+3z} + \dots + A_n e^{ni(x-t)+nz} \right) \quad (3.25)$$

$$\zeta = \bar{\zeta} + \frac{1}{2} \left( B e^{i(x-t)} + B_2 e^{2i(x-t)} + B_3 e^{3i(x-t)} + \dots + B_n e^{ni(x-t)} \right) \quad (3.26)$$

Donde  $(x, y)$  y  $z$  son coordenadas horizontales y verticales respectivamente,  $t$  es el tiempo,  $\bar{\phi}$  y  $\bar{\zeta}$  son los valores medios de la velocidad y el desplazamiento,  $A, A_n, B, B_n$  son amplitudes armónicas complejas.

Trulsen *et al.* (2000) explican como la ecuación no lineal modificada de Schrödinger (NLMS) se puede desarrollar empleando un operador pseudo-diferencial en la parte lineal con lo que se obtiene una dispersión lineal exacta. En dos dimensiones horizontales se expresa como

$$\frac{\partial B}{\partial t} + L(\partial_x, \partial_y) B + \frac{i}{2} |B|^2 B + \frac{3}{2} |B|^2 \frac{\partial B}{\partial x} + \frac{1}{4} B^2 \frac{\partial B^*}{\partial x} + i \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} B = 0 \quad ; \quad z = 0 \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial z} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} |B|^2 \quad ; \quad z = 0 \quad (3.28)$$

$$\nabla^2 \bar{\phi} = 0 \quad \text{para} \quad -h < z < 0 \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial z} = 0 \quad \text{para} \quad z = -h \quad (3.30)$$

Donde el operador pseudo-diferencial  $L$  es

$$L(\partial_x, \partial_y) = i \left\{ \left[ (1 - i\partial_x)^2 - \partial_y^2 \right]^{1/4} - 1 \right\} \quad (3.31)$$

Las ecuaciones anteriores se pueden invertir respecto al tiempo y el espacio para obtener una formulación en el dominio del espacio

$$\frac{\partial B}{\partial x} + L(\partial_x, \partial_y) B + i|B|^2 B - 8|B|^2 \frac{\partial B}{\partial t} - 2B^2 \frac{\partial B^*}{\partial t} - 4i \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} B = 0 \quad ; \quad z = 0 \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial t} |B|^2 \quad ; \quad z = 0 \quad (3.33)$$

$$\nabla^2 \bar{\phi} = 0 \quad \text{para} \quad -h < z < 0 \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial z} = 0 \quad \text{para} \quad z = -h \quad (3.35)$$

Lo anterior se hace considerando que  $\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} = -2 \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t}$ . Dicha transformación también se ve reflejada en el Laplaciano en el potencial de la velocidad inducida en la ec. 3.8, quedando de la forma

$$\mathcal{L}(\partial_t, \partial_y) = -i \left\{ \left[ (1 + i\partial_t)^4 + \partial_y^2 \right]^{1/2} - 1 \right\} \quad (3.36)$$

A través de diversos procesos matemáticos, el operador Laplaciano es algebraico y la ecuación NLMS queda como

$$\frac{\partial B}{\partial x} + 2 \frac{\partial B}{\partial t} + i \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} + i|B|^2 B - 8|B|^2 \frac{\partial B}{\partial t} - 2B^2 \frac{\partial B^*}{\partial t} - 4i \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} B = 0 \quad ; \quad z = 0 \quad (3.37)$$

Y la reconstrucción del desplazamiento en la superficie oceánica (que definirá el comportamiento de las olas) se expresa como

$$\bar{\zeta} = - \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} \quad (3.38)$$

$$B_2 = \frac{1}{2} B^2 + iB \frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.39)$$

y

$$B_3 = \frac{3}{8} B^3 \quad (3.40)$$

### Implementación numérica

Con motivos de este proyecto, para poder llevar a cabo la simulación de escenarios de marejada en las costas oaxaqueñas, es necesario definir condiciones de frontera de tiempo periódicas. Entonces, considerando que B se puede representar a través de un grupo de modos de vibrar, la transformada de Fourier del par que compone a B queda definida como

$$\hat{B}(x, \omega_j) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} B(x, t_m) e^{i\omega_j t_m}, \quad (3.41)$$

$$B(x, t_m) = \sum_{-\frac{M}{2} < j < \frac{M}{2}} \hat{B}(x, \omega_j) e^{-i\omega_j t_m}$$

donde  $\omega_j = 2\pi_j/T$ ,  $t_m = mT/M$ , y  $T$  es la longitud del periodo dominante.

## 4. EXPOSICIÓN DE INMUEBLES

### 4.1 Introducción

Hasta el momento se han mostrado los pasos necesarios para llevar a cabo la definición del peligro ocasionado por las distintas amenazas naturales como sismo, tsunami y marejada, sin embargo, esta definición es solamente una de las partes necesarias para llevar a cabo la evaluación formal del riesgo. Por ello, es necesario definir cuáles serán los inmuebles expuestos a dichas amenazas y las características que éstos presentan con el objetivo de definir su vulnerabilidad en función de la intensidad de cada amenaza.

### 4.2 Vulnerabilidad estructural

La vulnerabilidad de una edificación, es la relación entre la intensidad de la amenaza y el nivel de daño ocasionado en la edificación, este daño da como resultado una pérdida, denominada pérdida bruta que representa el costo de reparación o reemplazo de la estructura.

La estimación del daño se mide en términos del nivel de daño medio, una forma de relacionar el daño medio y la intensidad de una amenaza es a través de curvas de vulnerabilidad, donde la intensidad de la amenaza se puede expresar en términos, en el caso de sismo, de la aceleración máxima del suelo y aceleración espectral, en el caso de tsunami y marejada del tirante de agua que se presente en cada sitio.

El daño en un inmueble está relacionado con sus características estructurales, por lo tanto, para su correcto estudio, es necesario llevar a cabo clasificaciones de acuerdo a los tipos estructurales existentes. Las funciones de vulnerabilidad para una misma edificación variarán dependiendo de la amenaza ante la cual se esté haciendo la evaluación del daño.

Para el caso de edificaciones, existen estudios que muestran que el daño o pérdida se relaciona con el valor de la distorsión de entrepiso, la cual se define como la relación entre el desplazamiento relativo entre dos niveles y la altura de entrepiso. Existe un número importante de estudios que han concluido que este parámetro de respuesta estructural es el que tiene mejor correlación con el daño estructural y no estructural y por lo tanto con la pérdida bruta.

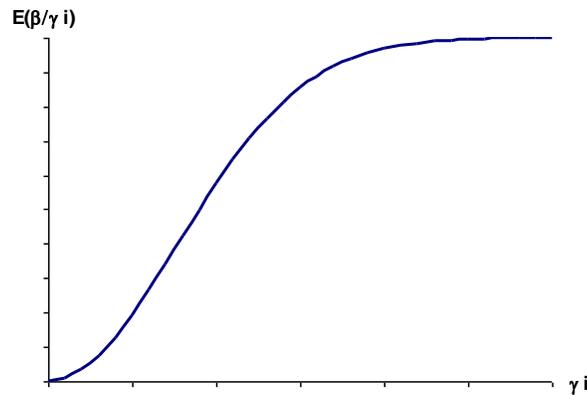
La forma de la función escogida para las funciones de vulnerabilidad proviene de la probabilidad acumulada de una distribución de extremos, y tiene la siguiente forma funcional:

$$E(\beta/\gamma) = 1 - 0.5^{\theta}, \quad \theta = \left( \frac{\gamma}{\bar{\gamma}} \right)^{\rho} \quad (4.1)$$

En donde  $\beta$  es la pérdida relativa que experimenta la estructura (toma un valor entre 0 y 1),  $\gamma$  es la distorsión de entrepiso de la estructura,  $\bar{\gamma}$  es una distorsión de referencia y corresponde al valor para el que se presenta un 50% de pérdida, y  $\rho$  es un parámetro de la función y gobierna la pendiente de la curva de vulnerabilidad.

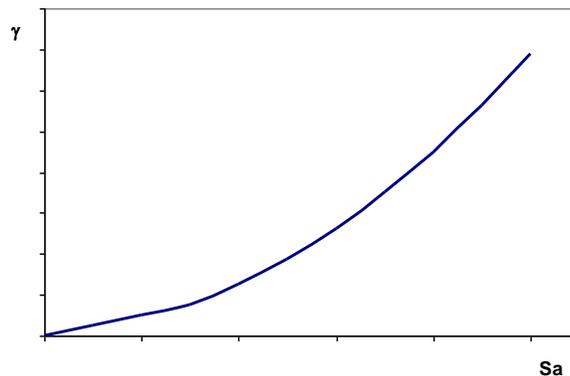
En la Figura 4.1 se muestra gráficamente la forma de la función de vulnerabilidad para un tipo de edificación cualquiera. En el eje de las abscisas se encuentra el parámetro de daño dado

por la distorsión  $(\gamma_i)$  y en el eje vertical el valor esperado de las pérdidas asociado dado el parámetro de daño  $(E(\beta|\gamma_i))$ .



**Figura 4.1.** Función de vulnerabilidad.

La distorsión máxima de una estructura depende de la intensidad sísmica denominada pseudoaceleración espectral, la cual se relaciona directamente con la fuerza sísmica que la edificación soportaría. La distorsión máxima depende de la estructuración, del número de pisos de la estructura, de las contribuciones de las deformaciones de corte y de flexión en la deformada total de la estructura, de su resistencia lateral, del factor de reducción de fuerzas laterales (que depende a su vez del código con el que fue diseñada). En la Figura 4.2 se muestra un ejemplo de la variación de la distorsión de entrepiso  $(\gamma)$  de un edificio cualquiera en función del parámetro de intensidad, dado en este caso por la pseudoaceleración  $(S_a)$ .



**Figura 4.2.** Distorsión de entrepiso para una estructura en función de la pseudoaceleración.

### 4.3 Clasificación estructural

Como se comentó anteriormente, es importante definir el tipo de sistema estructural que un inmueble posee, ya que con base en esta característica, se estimarán los efectos que un determinado peligro genere en la construcción.

Por esta razón, a continuación se mencionan las características de los principales sistemas estructurales que contienen los inmuebles del estado de Oaxaca que se verían afectados por los fenómenos naturales en estudio.

### **Muros de mampostería**

Este es el sistema de construcción por excelencia en el estado de Oaxaca. Este tipo de sistemas estructurales son construcciones muy rígidas, de pocos niveles y que generalmente cuentan con un entrepiso rígido de concreto que se conoce en el campo de la ingeniería como diafragma, los muros son forzados a comportarse del modo en que son más competentes, es decir, soportando cargas laterales actuando en su propio plano. El mecanismo de falla en estos casos consiste en la aparición de grietas diagonales en la porción más esforzada del muro, que es el primer entrepiso. Estas grietas aumentan conforme se incrementa el comportamiento no lineal del muro, hasta el momento en que su capacidad para soportar la carga vertical disminuye al punto de presentar colapsos parciales o totales. En el caso de muros de mampostería acoplados, es decir, unidos por traveses, son justamente estos elementos, sometidos a grandes fuerzas de flexión y principalmente de cortante, los que experimentan daños importantes que en la mayoría de los casos no compromete la estabilidad vertical del edificio.



**Figura 4. 3.** Construcción típica de muros de mampostería.

### **Muros de adobe**

Las construcciones de adobe, de las que se encuentran con mayor frecuencia en el interior de estado de Oaxaca, son de las más vulnerables en el caso de sismos. Sin embargo, muchos estudios indican que los muros de adobe pueden tener una resistencia sísmica razonable si se cuenta con un diafragma rígido y un adecuado detallado de los muros, mismos que deben incorporar algún elemento que le brinde resistencia a la tensión. Lamentablemente, la existencia de diafragmas en construcciones de adobe no es algo frecuente, ya que se prefiere cubrirlos con materiales frágiles sobre retículas de madera o similar. No obstante, si se cuenta con un diafragma, se puede esperar un comportamiento adecuado de estas construcciones, sin llegar a tener la resistencia de los muros de mampostería confinada o reforzada. El daño en este tipo de construcciones es similar a la de los muros de mampostería, es decir, tempranamente pueden aparecer grietas diagonales que se concentran en una o dos grietas que van creciendo si el muro no tiene ningún tipo de refuerzo, o bien pueden distribuirse sobre todo el plano del muro si éste cuenta con algún

refuerzo. En los casos más severos, el agrietamiento crece fuertemente, y puede incluir la rotura de varias unidades de adobe. Cuando el deterioro del muro es importante, pierde su capacidad de carga y entonces se puede producir un colapso parcial del techo y de parte del muro.



**Figura 4.4.** Construcción típica de muros de adobe.

#### ***Muros de mampostería con unidades huecas***

El comportamiento de estas construcciones es similar a las de mampostería sólida, con la diferencia que la existencia de unidades de mampostería huecas conduce a fallas frágiles de aplastamiento en los extremos del muro. Esta característica incrementa el daño en estas construcciones, es decir, las vuelve más vulnerables que los edificios construidos con unidades sólidas de mampostería.



**Figura 4.5.** Construcción típica de muros de mampostería hueca.

#### ***Muros sin diafragma***

Este tipo se caracteriza por tener techos ligeros de lámina, madera con teja u otros, tiene un comportamiento muy distinto al de sistemas similares con diafragma rígido. La ausencia del diafragma cambia el comportamiento de los muros, y entonces estos son sometidos a fuerzas laterales fuera de su plano. Bajo estas condiciones, la resistencia a flexión y cortante disminuyen dramáticamente; en la mayoría de los casos los muros caen fuera de su

plano, aunque se puede distinguir también una restricción proporcionada por los muros perpendiculares unidos al muro. Ante cargas laterales fuera de su plano, y dado que, teóricamente, las juntas de mortero tienen una resistencia a la tensión despreciable, lo único que puede mantener la estabilidad del muro es la carga gravitacional soportada por el muro. En ese sentido, a mayor carga gravitacional se puede tener una mayor resistencia lateral, sin embargo la carga actuante es también proporcional a la carga soportada.



**Figura 4.6.** Construcción de muros sin diafragma o techo ligero.

### **Muros débiles**

Por material débil se debe entender a cualquier material que no tiene características técnicas adecuadas para su uso en sistemas estructurales, como cartón, lámina de zinc, madera, etc. Como se puede ver, la variedad es amplia, y por lo tanto la resistencia y comportamiento es igualmente variada, por lo que resulta imposible determinar parámetros técnicos que tipifiquen un comportamiento como material estructural. En ese sentido, se proponen los siguientes criterios:

- a) En ausencia de una material noble, la vulnerabilidad de la construcción es elevada.
- b) El comportamiento de estos materiales es evidentemente frágil.
- c) La distorsión relativa de entrepiso que genera daños en la construcción es pequeña, incluso menor que la de la construcción de muros de mampostería con piezas huecas sin diafragma, que es la construcción que soporta menos distorsiones de entrepiso.
- d) La existencia de diafragma no cambia el comportamiento de estas construcciones (independientemente que resulta muy poco probable contar con un diafragma rígido soportado por muros de materiales poco competentes).



**Figura 4.7.** Construcción de materiales frágiles.

### **Marcos de acero**

Los marcos de acero deben, teóricamente, iniciar su comportamiento inelástico en las traveses, cerca de su encuentro con las columnas. Ante cierta intensidad se inicia el comportamiento no lineal en las bases de las columnas, y entonces se incrementa la probabilidad de que se forme un mecanismo que vuelva inestable al edificio. El daño en las traveses es fácilmente reparable, y consiste principalmente en alabeos de los patines con compresión y del alma, pudiéndose llegar a la rotura de parte de estos elementos. Las conexiones son eslabones particularmente frágiles en estas construcciones. Si bien el criterio para diseñarlas es que se les debe dimensionar y detallar para una fuerza ligeramente mayor a la capacidad de la sección que va a conectar, la realidad ha mostrado que en muchos casos los daños más notables en este tipo de estructuras se han originado en las conexiones. Una fuente adicional de reducción de la integridad estructural de estas construcciones es la potencial corrosión de los elementos estructurales, por lo que la falta de mantenimiento de estos edificios a largo o mediano plazo puede repercutir en la vulnerabilidad.



**Figura 4.8.** Construcción de marcos de acero.

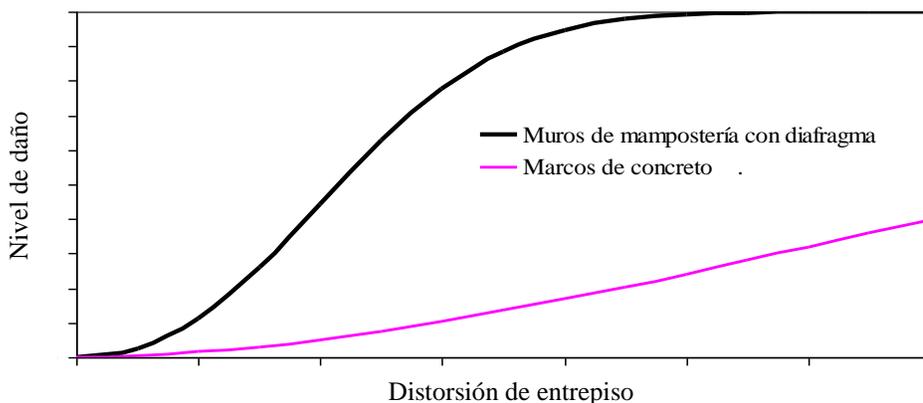
### **Marcos de concreto**

El comportamiento es similar a las estructuras de marcos de acero. El diseño y detallado de los elementos de concreto debe favorecer el trabajo inelástico de las traveses, y evitar la formación de articulaciones plásticas en las columnas. En este tipo de construcciones, el comportamiento no lineal de las traveses se manifiesta por una caída temprana del concreto de recubrimiento en las zonas más esforzadas, dejando al descubierto el acero transversal y longitudinal. En casos más severos, existe rotura del acero transversal y pandeo o rotura del acero longitudinal, con el consecuente deterioro del concreto dentro del núcleo confinado. Los daños más notables en este tipo de estructuras están asociados a un detallado inadecuado, principalmente del refuerzo transversal, así como de las dimensiones de los elementos estructurales o una configuración inadecuada del edificio. El deterioro natural del concreto es relativamente lento, sin embargo es necesario darle un mantenimiento a los elementos estructurales, sin que este factor sea tan relevante como en el caso de las construcciones de acero.

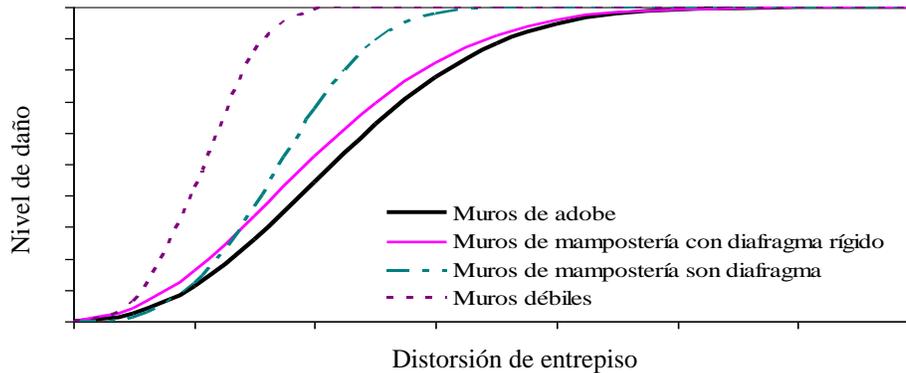


**Figura 4.9.** Construcción de marcos de concreto.

Con base en estudios de vulnerabilidad, trabajos experimentales publicados y la experiencia en modelaje catastrófico, es posible obtener las curvas de vulnerabilidad para los diferentes tipos de construcciones descritas anteriormente. En la Figura 4.10 se muestra un ejemplo de la forma de las curvas obtenidas de funciones de vulnerabilidad para edificaciones construidas con muros de mampostería y marcos de concreto; en la figura 4.11 se hace una comparación de las curvas de vulnerabilidad para muros de mampostería con diafragma rígido y sin diafragma, para aquellas construidas con muros de abobe así como también, aquellas construidas con muros débiles. Nótese que el valor esperado de las pérdidas (implícitamente el daño en las estructuras) dependen del sistema estructural que compone a la estructura.



**Figura 4.10.** Funciones de vulnerabilidad para edificaciones con muros de mampostería o marcos de concreto.



**Figura 4.11.** Funciones de vulnerabilidad para edificaciones con muros de adobe, mampostería o muros débiles.

Los valores de los parámetros  $\gamma$  y  $\rho$  empleados en la ecuación 4.1 que caracterizan a las funciones de vulnerabilidad para los tipos estructurales más comunes en el estado se muestran en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1.** Valores de los parámetros  $\gamma$  y  $\rho$  para los tipos estructurales.

#	Descripción tipo estructural	$\gamma$	$\rho$
1	Adobe sin diafragma c/cubierta ligera	0.004084	3.4874
2	Adobe sin diafragma c/cubierta pesada	0.004084	3.4874
3	Marco de concreto con diafragma	0.018305	2.0847
4	Marcos de Concreto sin diafragma c/cubierta ligera	0.014145	1.6315
5	Marcos de Concreto sin diafragma c/cubierta pesada	0.013313	1.6315
6	Madera con losa de concreto	0.031003	2.3888
7	Madera sin diafragma c/cubierta ligera	0.031623	1.9770
8	Madera sin diafragma c/cubierta pesada	0.028460	1.9770
9	Muros de carga de mampostería con losa de concreto	0.004299	2.3249
10	Muros de mampostería sin diafragma c/cubierta ligera	0.005159	3.6269
11	Muros de mampostería sin diafragma c/cubierta pesada	0.004901	3.6269
12	Prefabricada sin diafragma c/cubierta ligera	0.006019	2.7899

Es importante mencionar que las propuestas de funciones y curvas de vulnerabilidad sobre las que se ha estado trabajando corresponden a idealizaciones de las edificaciones que existen en el estado, por lo que para definir las funciones que se emplearán en el proyecto, es necesario contar con las bases de datos sobre la infraestructura expuesta que se quiera estudiar.

#### 4.4 Actualización futura de bases de datos

Considerando que el atlas de riesgos del estado de Oaxaca no debe ser una herramienta estática que sea obsoleta con el paso del tiempo, es necesario que las bases de datos que definen a los activos expuestos se vayan actualizando según nuevos activos se construyan o se modifiquen. Con base en lo anteriormente expuesto y considerando que el personal técnico del IEPC lleva a cabo, dentro de sus actividades, levantamientos en campo de información de inmuebles como hospitales, escuelas y viviendas, ERN, Ingenieros Consultores ha diseñado un documento donde se especifica la información que es necesario conocer cuando se haga un

levantamiento de datos de un inmueble. Este documento se muestra en el Anexo C. Con la información recopilada con dicho documento, se lleva a cabo las bases de datos que se emplean para definir el riesgo

A continuación se presenta la descripción del documento a emplear para la recopilación de información. En primera instancia, el documento está dividido, de manera general, en dos grupos importantes, el primero corresponde a los datos generales de reconocimiento y ubicación que sirven para identificar a la edificación, el segundo grupo presenta el aspecto técnico que servirá para definir el sistema estructural y por lo tanto, la función de vulnerabilidad a utilizar para estimar el riesgo ante un peligro definido.

### ***Datos de referencia***

Son los datos generales de reconocimiento de la estructura como el nombre o razón social de la misma (*i. e.* nombre de hospital o escuela), a fecha en la que se llevó a cabo la inspección y el responsable de llevar a cabo la misma.

### ***Datos de localización***

Estos datos son de suma importancia para poder definir de una manera adecuada el peligro ante el cual está expuesta una estructura. En este sentido, los datos como la longitud y la latitud son los ideales para tal fin, sin embargo, cuando no se cuenta con dicha información, se pueden emplear datos auxiliares como el código postal donde se ubica la estructura, el municipio o la agencia.

### ***Datos de ubicación***

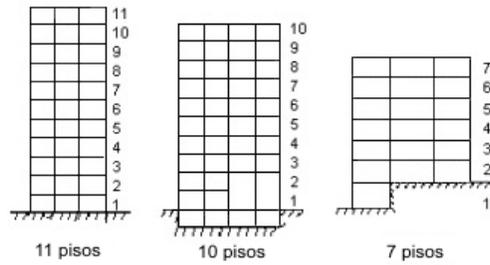
Considerando que la información que se recopile en cada visita de campo a las diferentes estructuras debe ser de utilidad en caso que se quieran hacer estudios de riesgo para otras amenazas que no estén incluidas en este proyecto, como inundaciones o deslizamientos, se presentan en esta sección preguntas sobre la rugosidad y topografía del sitio donde la estructura está desplantada.

A continuación se presentan y describen las secciones donde se recopila la información referente a las características estructurales que ayudarán a definir la vulnerabilidad del inmueble.

### ***Datos técnicos de las estructura***

#### ***Número de pisos (NUM\_PISOS)***

Corresponde al número de pisos que tiene el edificio que se quiere evaluar. El número de pisos se debe contar a partir de la planta baja, sin incluir sótanos. En caso de que el edificio se ubique en zonas con pendientes del terreno el número de pisos debe de contarse a partir del piso más bajo. Cuando existan mezanines se deben contar estos como pisos.



**Figura 4.12.** Ejemplos de número de pisos.

*Tipo de inmueble (ES\_INDUSTRIAL)*

- Se deberá especificar:
- (1) inmueble tipo industrial,
  - (2) inmueble no industrial

El objetivo de esta clasificación es distinguir aquellas edificaciones industriales cuyo sistema estructural, y por lo tanto su respuesta ante sismos, difiere de otras edificaciones residenciales o comerciales.

Algunas edificaciones típicas que podrían clasificarse como industriales son: fábricas, talleres, almacenes, bodegas y plantas de ensamble, entre otras. Algunas edificaciones de uso comercial pueden tener una estructura que pertenece a la clasificación de edificio industrial. Tal es el caso, por ejemplo, de tiendas de autoservicio cuyos locales están formados por estructuras de grandes claros de un solo nivel.

*Uso del inmueble (ED\_USO)*

Se debe seleccionar el uso principal del edificio de acuerdo a la Tabla 4.2, si en dicha tabla no se encuentra la opción exacta, se deberá seleccionar la que más se aproxime al uso de la estructura. La importancia de indicar el uso es porque el diseño de las estructuras está en función del mismo, por lo que el Sistema toma en cuenta las diversas consideraciones que se hicieron al diseñarse la estructura según su uso original.

**Tabla 4.2.** Uso de la estructura.

1	Almacén	11	Escuela	21	Museo
2	Banco	12	Estacionamiento	22	Oficina Gubernamental
3	Biblioteca	13	Fábrica	23	Oficina Privada
4	Central de Comunicaciones	14	Funeraria	24	Restaurante
5	Central Eléctrica	15	Hangar	25	Servicios de Emergencia
6	Centro Comercial	16	Hospital	26	Terminal de Transporte
7	Comercio	17	Hotel	27	Tienda de Departamentos
8	Depósito de Sustancias Explosivas	18	Industria	28	Vivienda
9	Depósito de Sustancias Inflamables	19	Laboratorio	29	Otro
10	Depósito de Sustancias Tóxicas	20	Librería		

*Tipo de columnas (EST\_COLUMNAS)*

Se deberá especificar el material con que se construyeron las columnas de acuerdo al siguiente criterio:

- (1) columnas de concreto reforzado
- (2) columnas de acero
- (3) sin columnas



**Figura 4.13.** Ejemplo de columnas estructurales.

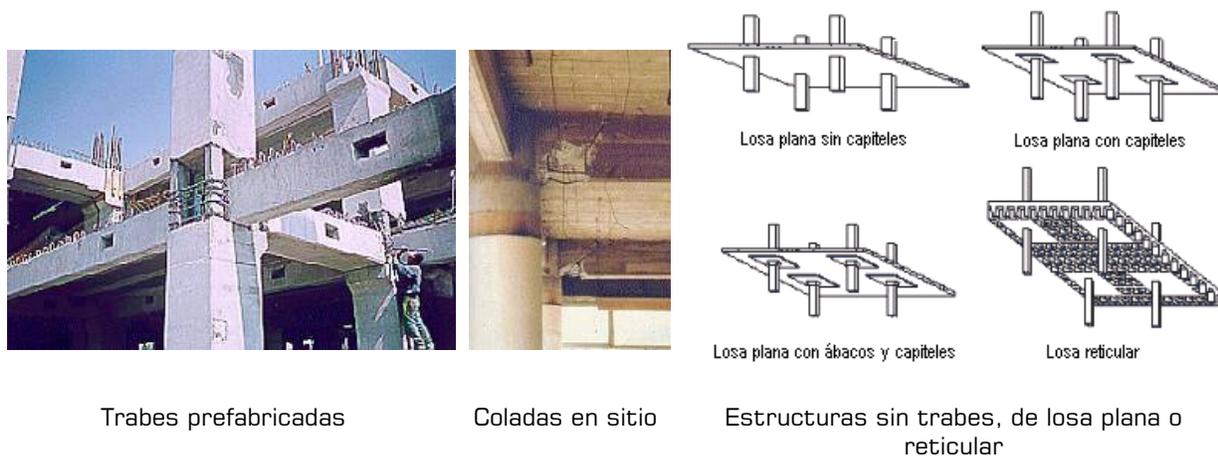
Las columnas de concreto reforzado tienen sección rectangular, cuadrada o circular. La dimensión de su sección transversal es como mínimo de 20 cm y llega a tener hasta poco más de 1.0 m por lado. Las columnas de acero estructural pueden tener sección rectangular, cuadrada, circular o sección I o H. Normalmente están formados por placas soldadas, aunque puede haber casos en que sean de perfiles comerciales.

En algunas ocasiones no será fácil distinguir el material de las columnas debido a los acabados que pueden rodear a las mismas o a la posible protección contra fuego que tienen las columnas de acero estructural. Es conveniente, en la medida de lo posible, levantar los plafones para observar la estructura principal y determinar los materiales con las que estén construidas.

*Tipo de trabes (EST\_TRABES)*

Se deberá especificar la forma en que se construyeron las trabes:

- (1) trabes coladas en sitio
- (2) trabes prefabricadas
- (3) no tiene trabes



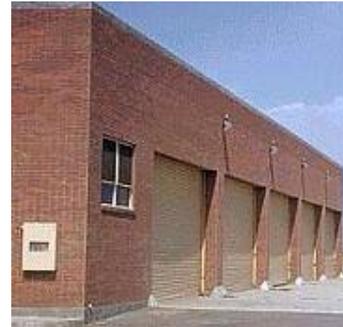
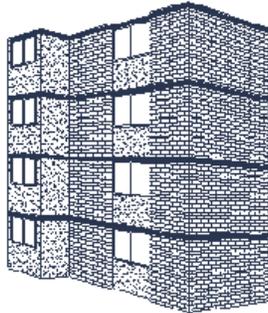
**Figura 4.14.** Tipos de trabes.

### *Muros de carga (EST\_MUROS)*

Se deberá especificar si el edificio: (1) sí tiene muros de concreto  
(2) no tiene muros de concreto

Los muros de carga de una estructura pueden ser de mampostería (ladrillo o block) o de concreto. Estos muros proporcionan gran rigidez lateral, ayudando a un adecuado comportamiento estructural ante la acción de un sismo.

Para saber si los muros de carga son de concreto o de mampostería se debe localizar sitios en los que no se colocó el aplanado y el acabado tales como cubos de elevadores, escaleras y fachadas de colindancia. Se recomienda revisar los planos estructurales. En general, los edificios modernos y altos que tienen muros están hechos de concreto. Los edificios de baja altura (hasta cinco pisos aproximadamente) tendrán en general muros de mampostería. Asimismo, los muros de concreto tendrán espesores que podrán variar entre 15 y 25 cm, mientras que los muros de mampostería variarán entre 12 y 20 cm. En caso de duda se deberá seleccionar la opción 2 la cual indica que no tiene muros de concreto.



**Figura 4.15.** Estructuras de mampostería con muros de carga.

### *Tipo de cubierta (EST\_CUBIERTA)*

Se deberá especificar el tipo de estructura: (1) cubierta ligera  
(2) cubierta pesada

La cubierta se considera ligera si está construida por alguno de los siguientes elementos: lámina metálica, lámina translúcida, lámina de asbesto, sistemas prefabricados de láminas y aislantes térmicos y láminas engargoladas, entre otros. La cubierta se considera pesada si está construida a base de alguno de los siguientes elementos: losas de concreto, elementos prefabricados de concreto y láminas tipo losacero con capa de compresión de concreto, entre otros.

### *Longitud de los claros (EST\_CLAROS)*

Se deberá especificar la longitud de los claros: (1) cortos  
(2) medianos  
(3) largos

Esta longitud será la distancia que exista entre elementos de apoyo vertical, tales como columnas y muros de carga. En la gran mayoría de los edificios se distinguen dos direcciones principales en la planta de los mismos, y la longitud de los claros generalmente es diferente



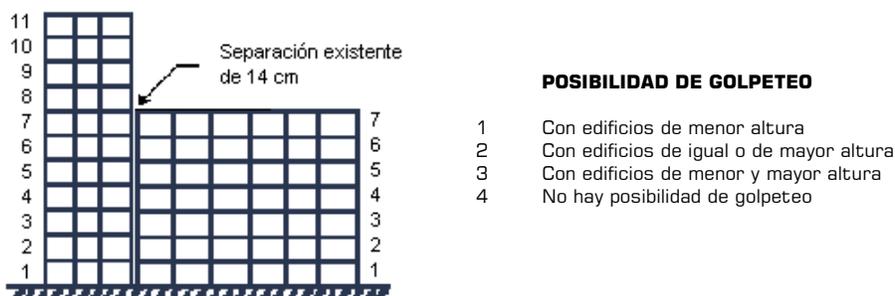




**Figura 4.18.** Edificaciones con sobrepeso.

*Posibilidad de golpeteo (OTR\_GOLPETEO)*

Se definirá si el edificio tiene posibilidades de golpeteo durante un sismo, de acuerdo a la escala mostrada en la figura siguiente. El golpeteo entre edificios puede causar daños importantes a uno o ambos de los edificios que intervienen en el mismo. Para que estos no se golpeen entre sí durante un sismo intenso, la separación libre entre dos edificios debe ser aproximadamente 3 cm por cada piso en el edificio de menor altura. Si la separación libre entre ambos edificios es menor, se debe indicar al Sistema que sí existe la posibilidad de golpeteo del edificio con algún edificio vecino.



**Figura 4.19.** Condiciones de golpeteo en estructuras.

Para ejemplificar una manera de predecir si existirá golpeteo se muestra arriba una figura de dos edificios, uno de 11 niveles y otro de 7 niveles. La separación libre existente entre ellos es de 14 cm, pero se estima que el edificio pequeño tendrá un desplazamiento máximo de 7 niveles x 3 cm/nivel = 21 cm. Durante un sismo intenso, como la separación existente es de 14 cm, menor que 21 cm, entonces existe la posibilidad de golpeteo entre estos dos edificios.



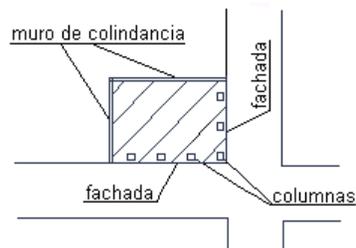
**Figura 4.20.** Edificio dañado por golpepeteo.

#### *Edificio en esquina (OTR\_ESQUINA)*

Se deberá definir si el edificio está:

(1)	ubicado en esquina
(2)	no ubicado en esquina

Un edificio localizado en esquina es más vulnerable ante la acción de los sismos si los muros colindantes con las edificaciones vecinas son mucho más resistentes que los marcos de las fachadas y no están adecuadamente desligados unos de los otros. De ser así, se tendrá un edificio con una gran irregularidad en planta, produciendo torsiones y un comportamiento indeseable, sobre todo en las fachadas que son más flexibles y menos resistentes. Cuando el edificio en esquina es simétrico o tiene los muros colindantes adecuadamente desligados de la estructura principal se deberá contestar indicar 2 en este campo.



**Figura 4.21.** Croquis de un edificio en esquina.

#### *Irregularidad en altura (OTR\_IRRE\_ELEVACIÓN)*

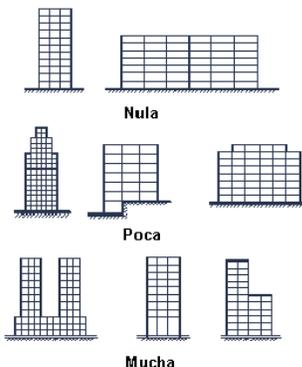
Se deberá especificar si el inmueble tiene, de acuerdo a su elevación:

- |     |                     |
|-----|---------------------|
| (1) | irregularidad nula  |
| (2) | poca irregularidad  |
| (3) | mucha irregularidad |

La estructura es más vulnerable cuando la distribución de los elementos resistentes en la altura del edificio no es uniforme. Configuraciones típicas que calificarían a un edificio con alta irregularidad en elevación son:

- Edificios con un primer entrepiso muy alto en comparación con el resto de los pisos.
- Edificios con un entrepiso cualquiera mucho más alto que el resto de los pisos.

- Edificios en los que se suspende la altura en algún nivel y no ha sido desligado del resto de la estructura.
- Edificios en los que elementos estructurales importantes (columnas o muros) se suspenden antes de llegar a la cimentación.



**Figura 4.22.** Condiciones de irregularidad.

#### *Irregularidad en planta (OTR\_IRRE\_PLANTA)*

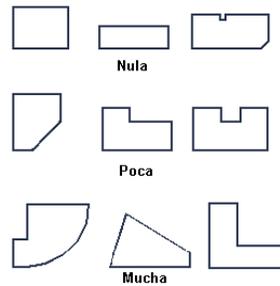
Se deberá definir si la irregularidad en planta del inmueble es:

- (1) nula
- (2) poca
- (3) mucha

Las estructuras simples, simétricas y regulares han presentado en términos generales mejor comportamiento que aquellas que no lo son. Bajo la acción de los sismos las estructuras irregulares y asimétricas tienden a presentar movimientos de torsión que causan daños severos.

La irregularidad en planta se refiere a una distribución asimétrica de los elementos resistentes (columnas, muros, contraventeos, etc.). En ocasiones puede tenerse una distribución simétrica desde el punto de vista arquitectónico, pero no lograrse una distribución simétrica de los elementos estructurales, como el caso de edificios en esquina. Configuraciones típicas con alta irregularidad en planta son:

- Edificios asimétricos (desde el punto de vista estructural)
- Edificios asimétricos por su forma en planta, como triangulares y con frentes curvos, entre otras
- Edificios muy alargados en planta. Se considera que un edificio es alargado (irregular) cuando la relación largo/ancho excede de 2.0
- Edificios con proyección en planta en forma de L, T, H o similares, en los que la proyección de la parte saliente excede el 20% de la dimensión total del edificio

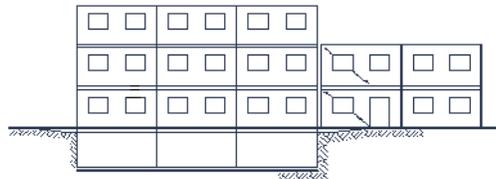


**Figura 4.23.** Condiciones de irregularidad en planta.

#### *Hundimientos diferenciales (OTR\_HUNDIMIENTOS)*

- Se deberá definir si el inmueble:
- (1) tiene hundimientos diferenciales
  - (2) no tiene hundimientos diferenciales

Los hundimientos diferenciales generan efectos que pueden ser apreciables a simple vista ya sea por los desplomes de la estructura (inclinación con respecto a la vertical) o por agrietamientos diagonales en muros divisorios o muros de carga. Si los asentamientos son pequeños sólo afectarán a elementos no estructurales y acabados, con poca posibilidad de afectar la estabilidad de la estructura. Sin embargo, cuando los hundimientos diferenciales son grandes, y se aprecian a simple vista, sus efectos sobre los elementos de la estructura pueden ser considerables. Los hundimientos diferenciales son más probables en zona de suelos blandos y pueden ser producidos a causa de un sismo, como consecuencia de la construcción de una edificación vecina o por defectos de la cimentación.



**Figura 4.24.** Asentamientos diferenciales.

#### *Daños previos (OTR\_DA\_PREVIOS)*

- Se deberá definir si el inmueble:
- (1) no tiene daños previos
  - (2) tiene daños previos ligeros
  - (3) tiene daños previos severos

Una estructura que se ha dañado durante algún sismo ha manifestado su gran vulnerabilidad. Existe una clara evidencia de que aquellos edificios que colapsan o que tienen daños graves durante sismos intensos, es porque ya se habían dañado durante sismos previos. En términos generales, será muy difícil identificar los daños estructurales de una edificación si es que ésta ha tenido un adecuado programa de mantenimiento. No obstante el buen mantenimiento no es señal de que la estructura vaya a tener un comportamiento satisfactorio en sismos futuros. Es posible encontrar indicios de daños previos en aquellos lugares o partes de la estructura que no se ven como muros de colindancia, ductos de instalaciones, cubos de escaleras o elevadores, sótanos y elementos estructurales tapados por plafones o acabados. La mejor manera de conocer si ha habido daños es preguntando a los dueños o ocupantes, aunque esta información está limitada a los años más recientes. Si



## 5. CREACIÓN DE LAS BASES DE DATOS DE ELEMENTOS EXPUESTOS

### 5.1 Introducción

A continuación se presentan las bases de datos a emplear, así como la asignación del sistema estructural para la definición del riesgo ante los diferentes peligros que se consideran en este proyecto (sismo, tsunami y marejada). Por cuestiones de disponibilidad, solamente se definen las bases de datos sobre la vivienda existente en el estado.

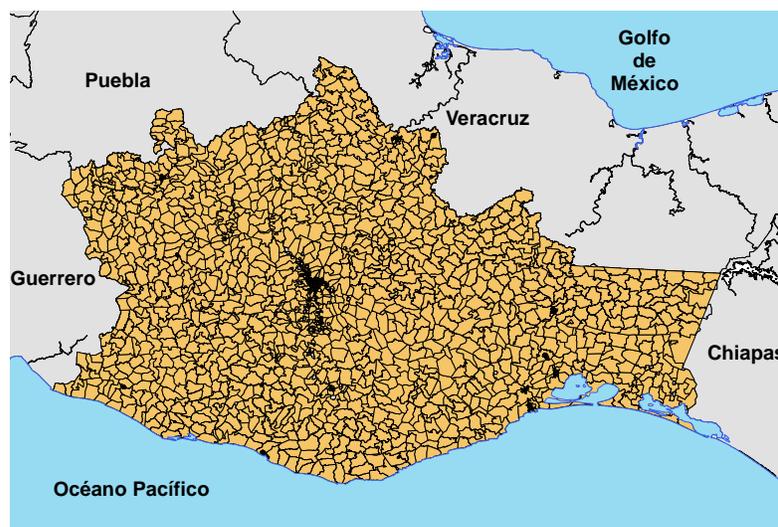
### 5.2 Información considerada (vivienda)

Con base en lo expuesto en el apartado anterior, se emplea la información que proporciona el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (*INEGI*) sobre vivienda en el estado de Oaxaca. Esta información se deriva de los censos económicos que dicha institución ha elaborado, donde se muestran tanto el número de viviendas como las características de éstas, todo esto a nivel de Áreas Geo-Estadísticas Básicas (AGEB), las cuales se emplearán para poder asignar, después de hacer algunas consideraciones, un sistema estructural y en consecuencia una función de vulnerabilidad para cada una de las amenazas estudiadas en este proyecto. Ejemplo de la información a utilizar es el número de viviendas, tipo de material en muros, pisos y techos, entre otras.

#### Definición de AGEB

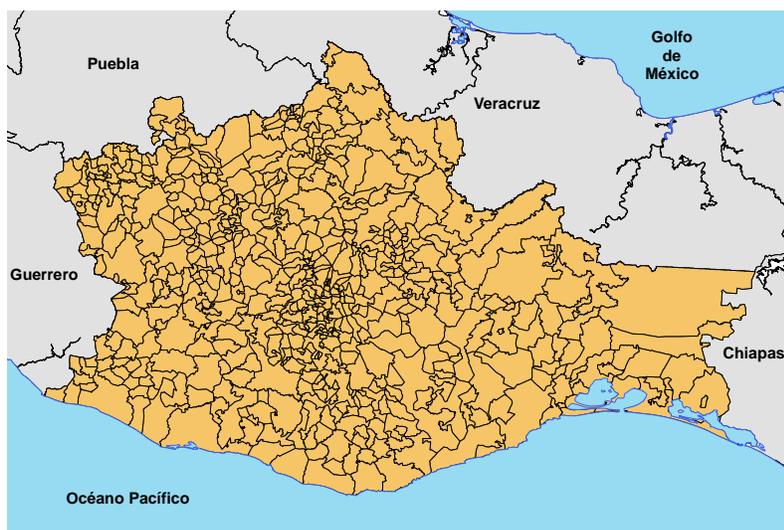
Las Áreas Geo-Estadísticas Básicas (AGEBs) son áreas territoriales construidas por el INEGI con fines operativos censales a partir de las localidades, de menor dimensión tanto territorial como poblacional respecto al municipio; se utilizan ampliamente para la elaboración de diversos indicadores. El INEGI divide a las AGEBs en rurales y urbanas, lo que resulta conveniente considerando que la infraestructura puede ser muy diferente en ambos casos.

En la figura 5.1 se muestra la distribución geográfica de los 2138 AGEBs que se tomaron en cuenta para el desarrollo de este proyecto.



**Figura 5.1.** Distribución de los 2138 AGEBs en el estado de Oaxaca.

En la figura 5.2 se muestran los 570 municipios en los cuales se divide el estado de Oaxaca. Cabe mencionar que dependiendo de la extensión de cada uno de los municipios, estos pueden conformarse por más de un AGEB, generalmente en zonas urbanas como la ciudad de Oaxaca, Tuxtpec, Salina Cruz y Huajuapán de León, entre otras, el número de AGEBs es considerablemente mayor con respecto a las zonas rurales.



**Figura 5.2.** Distribución de los 570 municipios en el estado de Oaxaca.

### 5.3 Información obtenida del INEGI

La estructura de la base de datos del INEGI consiste en un arreglo de columnas y renglones que permite identificar, caracterizar y georreferenciar a nivel AGEB las viviendas urbanas existentes en el estado al año 2005. El primer renglón de esta base de datos corresponde al nombre del estado, seguido del nombre del municipio y de la clave del AGEB. Las columnas siguientes del archivo corresponden a la información de materiales que componen las viviendas según los campos definidos en el primer renglón. El número de registros contenidos en la base de datos es de 2,138 correspondientes a cada uno de los AGEBs considerados.

Con la información anterior se puede llevar a cabo, de manera adecuada, una caracterización aproximada de la localización, cantidad y tipo de viviendas existentes en el estado. Los datos considerados para los fines del Atlas son: la clave del AGEB, la ubicación del AGEB, el tipo de viviendas en el AGEB, el número de viviendas totales en cada AGEB, el número de viviendas con techos de materiales ligeros, naturales y precarios, número de viviendas con techos de losas de concreto, tabique, ladrillo o terrado de viguerías, el número de viviendas con paredes de materiales ligeros, naturales y precarios y número de viviendas con paredes de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto. Estos son algunos de los campos más importantes para los fines del proyecto; sin embargo, aún se requiere contar con otros datos, considerados indispensables para una adecuada caracterización de las viviendas. En la tabla 5.1 se muestran los campos de la información a utilizar.

**Tabla 5.1.** Información a emplear para caracterizar los sistemas estructurales en vivienda.

NOMBRE DEL CAMPO	DESCRIPCIÓN
ESTADO	Estado
MUNICIPIO	Municipio
CLAVE AGEB	Clave de AGEB
TIPO	Tipo de AGEB: Rural o urbana
VIVPARHA	Viviendas particulares habitadas
VPH_CON_TL	Viviendas particulares con techos de materiales ligeros, naturales y precarios
VPH_CON_TC	Viviendas particulares con techos de losa de concreto, tabique, ladrillo o terrado con viguería
VPH_CON_ML	Viviendas particulares con paredes de materiales ligeros, naturales y precarios
VPH_CON_MM	Vivienda particulares con paredes de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto
VPH_CON_PT	Vivienda particulares con piso de tierra
VPH_CON_PC	Vivienda particulares con piso de concreto
VPH_CON_PM	Vivienda particulares con piso de madera
VPH_1CUA	Vivienda particulares con un cuarto
VPH_2CUA	Vivienda particulares con dos cuartos
VPH_3YMASC	Vivienda particulares con tres cuartos o más
VPH_AGDV	Vivienda particulares con agua potable
VPH_DREN	Vivienda particulares con drenaje
VPH_ENEL	Vivienda particulares con energía eléctrica
VPH_TBIE	Vivienda particulares con todos los bienes

Es importante mencionar que solamente se consideran las viviendas para la determinación del riesgo en el estado, esto es debido a que solo se cuenta con esta información para poder elaborar las bases de datos respectivas. El cálculo del riesgo se irá mejorando en la medida que se disponga de mayor y mejor información para tomar en cuenta todos los activos que puedan presentar pérdidas económicas durante la ocurrencia de sismos o tsunamis.

#### 5.4 Bases de datos obtenidas

Con la información anterior, se llegó a una clasificación que consiste en 5 sistemas estructurales (SE) para las viviendas localizadas en el estado de Oaxaca. Estos sistemas se describen en la tabla 5.2, cuyo comportamiento está descrito por diferentes funciones de vulnerabilidad.

**Tabla 5.2.** Descripción de los sistemas estructurales empleados en las bases de datos de vivienda.

NOMBRE DEL CAMPO	DESCRIPCIÓN
MADLO1	Muros precarios, techo débil, un solo nivel
ADOLO1	Muros adobe, techo débil, un solo nivel
MAMLO1	Muros mampostería, techo débil, un solo nivel
MAMPO1	Muros mampostería, techo losa, un solo nivel
MAMPO2	Muros mampostería, techo losa, dos niveles

Debido a la naturaleza de las bases de datos, las cuales están definidas a nivel AGEB, no es posible hacer una sola base de datos de la vivienda. Por esta razón, se definen 5 bases de datos, donde cada una de ellas corresponde a un tipo de sistema estructural.

En la tabla 5.3 se muestra una parte de las bases de datos creadas, donde se contienen los campos necesarios para poder llevar a cabo el cálculo de la pérdida.

**Tabla 5.3.** Ejemplo de base de datos de vivienda para el sistema estructural MADLO1.

ESTADO	MUNICIPIO	CLAVE_1	FECHA_INIC	FECHA_FIN	NUM_CASAS	VALFIS	VALHUM	SE_SISMO
20	014	200140001027-2	01/02/2010	31/10/2010	0	0.00	0	MADLO1
20	014	200140001013-0	01/02/2010	31/10/2010	57	11508881.40	0	MADLO1
20	014	200140001021-5	01/02/2010	31/10/2010	109	22008211.80	0	MADLO1
20	014	200140001023-4	01/02/2010	31/10/2010	0	0.00	0	MADLO1
20	014	200140001020-0	01/02/2010	31/10/2010	107	21604391.40	0	MADLO1
20	014	200140001016-4	01/02/2010	31/10/2010	362	73091492.40	0	MADLO1
20	014	200140001024-9	01/02/2010	31/10/2010	4	807640.80	0	MADLO1
20	014	200140001025-3	01/02/2010	31/10/2010	4	807640.80	0	MADLO1
20	014	200140001026-8	01/02/2010	31/10/2010	0	0.00	0	MADLO1
20	014	200140001011-1	01/02/2010	31/10/2010	90	18171918.00	0	MADLO1
20	014	200140001003-7	01/02/2010	31/10/2010	158	31901811.60	0	MADLO1
20	014	200140001004-1	01/02/2010	31/10/2010	206	41593501.20	0	MADLO1
20	014	200140001019-8	01/02/2010	31/10/2010	55	11105061.00	0	MADLO1
20	014	200140001015-A	01/02/2010	31/10/2010	108	21806301.60	0	MADLO1
20	014	200140001010-7	01/02/2010	31/10/2010	99	19989109.80	0	MADLO1
20	014	200140001022-A	01/02/2010	31/10/2010	43	8682138.60	0	MADLO1
20	014	200140001002-2	01/02/2010	31/10/2010	339	68447557.80	0	MADLO1
20	014	200140001017-9	01/02/2010	31/10/2010	202	40785860.40	0	MADLO1
20	014	200140001018-3	01/02/2010	31/10/2010	109	22008211.80	0	MADLO1
20	014	200140001007-5	01/02/2010	31/10/2010	181	36545746.20	0	MADLO1
20	039	200390001068-0	01/02/2010	31/10/2010	0	0.00	0	MADLO1
20	039	200390001067-6	01/02/2010	31/10/2010	0	0.00	0	MADLO1
20	039	200390001013-A	01/02/2010	31/10/2010	50	10095510.00	0	MADLO1
20	039	200390001066-1	01/02/2010	31/10/2010	0	0.00	0	MADLO1

La información que se muestra en la tabla anterior corresponde exclusivamente al sistema estructural definido como MADLO1, que según se describe en la misma tabla, este sistema corresponde a un tipo de edificación que presenta muros de adobe con una techumbre ligera, como los que se muestran en la figura 5.3.

Por razones de practicidad, la totalidad de esta base de datos, junto con las correspondientes a los sistemas estructurales restantes, se entregarán de forma digital, en formato "shape", para su debida representación y localización. Además, este es el formato requerido para hacer las evaluaciones de pérdidas correspondientes.



a) Pinotepa Nacional

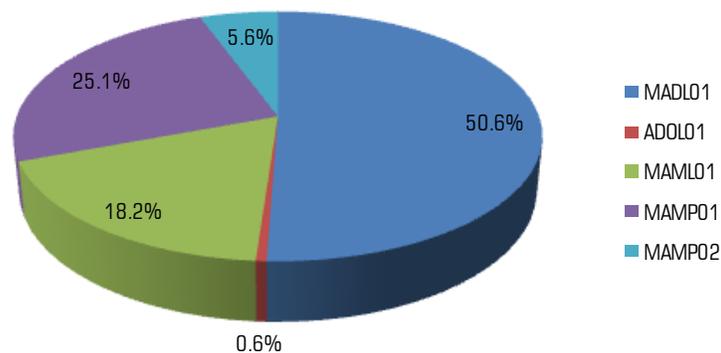


Salina Cruz

**Figura 5.3.** Ejemplos del sistema estructural MADLO1.

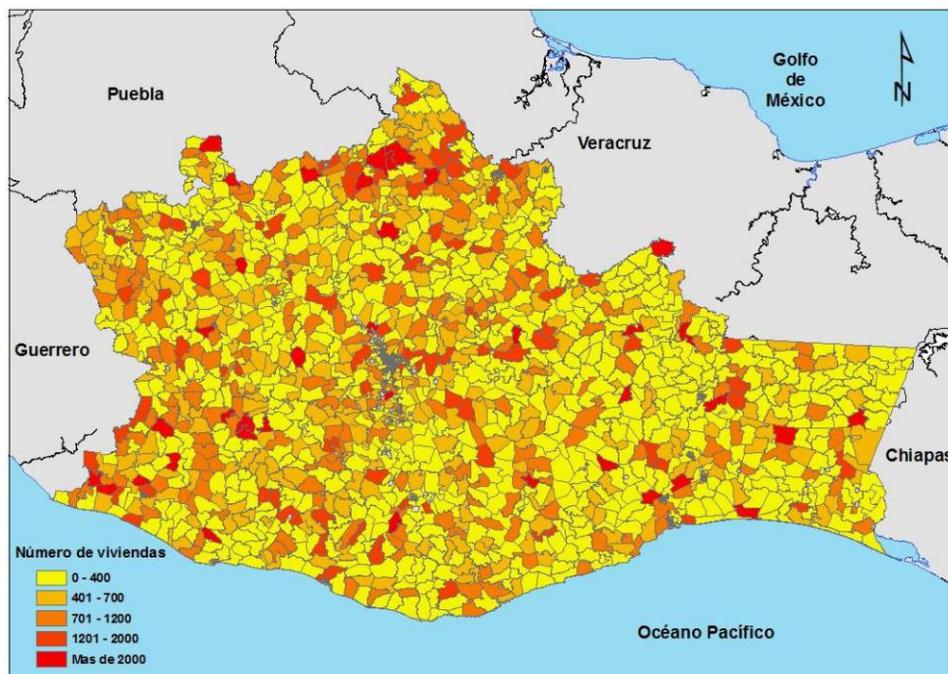
### 5.5 Estadísticas de la información generada

Como se ha comentado en párrafos anteriores, la información que se emplea en este proyecto corresponde al conteo rápido que lleva a cabo el INEGI en el año 2005. En total, se consideraron 1,046,531 viviendas distribuidas en el número de AGEBS ya mencionado. De este número de viviendas se obtuvo que un poco más del 50 % está construida con materiales ligeros o precarios, alrededor de un 18 % de mampostería con techumbres ligeras (lámina), un 25 % son viviendas de mampostería con losa de concreto, hasta el momento, estas viviendas son consideradas como de un solo nivel y apenas alrededor de un 6 % son casas de dos niveles construidas con mampostería y losa de concreto. Es importante recordar que esta información corresponde al año 2005 por lo que estas cifras pueden variar. Lo anterior se ve reflejado en la gráfica de la figura 5.4.



**Figura 5.4.** Distribución de la vivienda en el estado de Oaxaca según los sistemas estructurales definidos.

A continuación se describen, de manera desglosada, la forma en cómo se encuentran distribuidas las viviendas con base en el sistema estructural asignado, tanto a nivel AGEB como municipal.



**Figura 5.5.** Distribución de la vivienda por AGEB según su número.

### **Nivel AGEB**

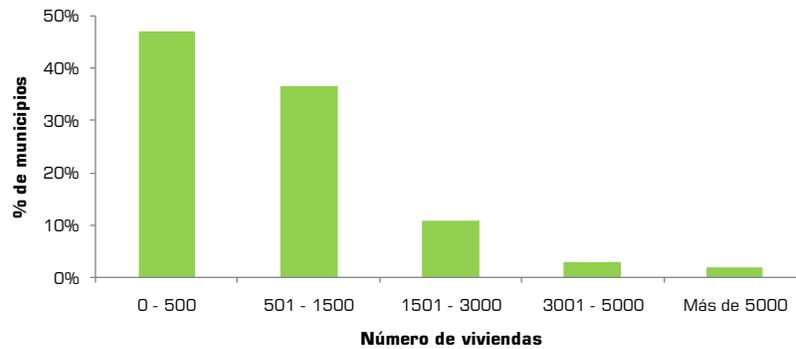
Al manejar cualquier base de datos, se considera que a mayor nivel de discretización, los resultados que se obtengan reflejarán de mejor manera la situación real en la que se encuentra el área de estudio, ya que se podrán emplear un mayor número de variables que describirán las características estructurales, las cuales, a su vez, definirán el comportamiento ante acciones externas.

Por la razón anterior, en esta sección se presentan los resultados y estadísticas del mayor nivel de discretización con el que se cuenta para la base de datos de vivienda (nivel AGEB).

#### *Sistema estructural MADLO1*

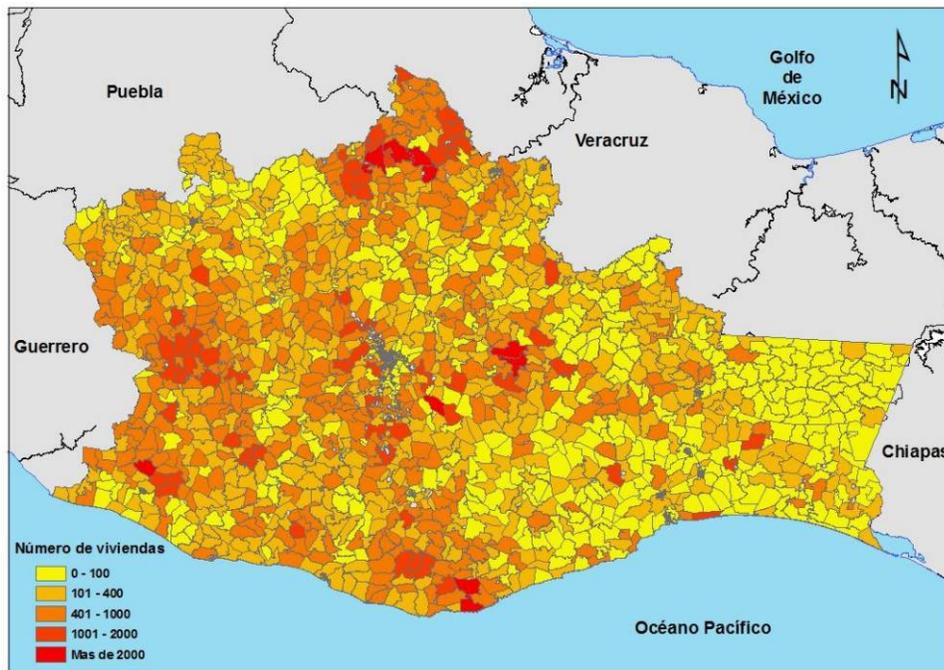
Las viviendas construidas con madera o materiales débiles son las más empleadas a lo largo del estado, esto se debe principalmente a que gran mayoría de las localidades se encuentran ubicadas en zonas montañosas, donde el tipo de material predominante son aquellos obtenidos de árboles o palmas, material que se emplea en la construcción de las viviendas tipo MADLO1.

De los datos empleados, se tiene que un poco más del 44% de los AGEBs considerados contienen 500 viviendas o menos, alrededor del 35% contiene más de 500 viviendas y menos de 1,500 y apenas un poco más del 0.5% contiene más de 5,000 viviendas (ver figura 5.6).



**Figura 5.6.** Porcentaje de AGEBs según el número de viviendas MADLO1.

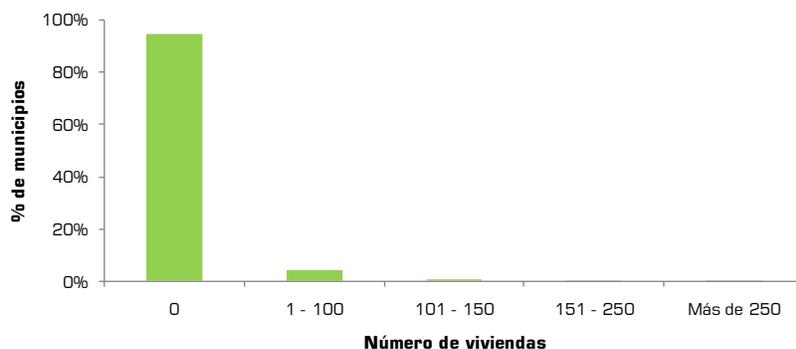
En la figura 5.7 se muestra la distribución de este tipo de vivienda.



**Figura 5.7.** Distribución del número de viviendas por AGEB para MADLO1.

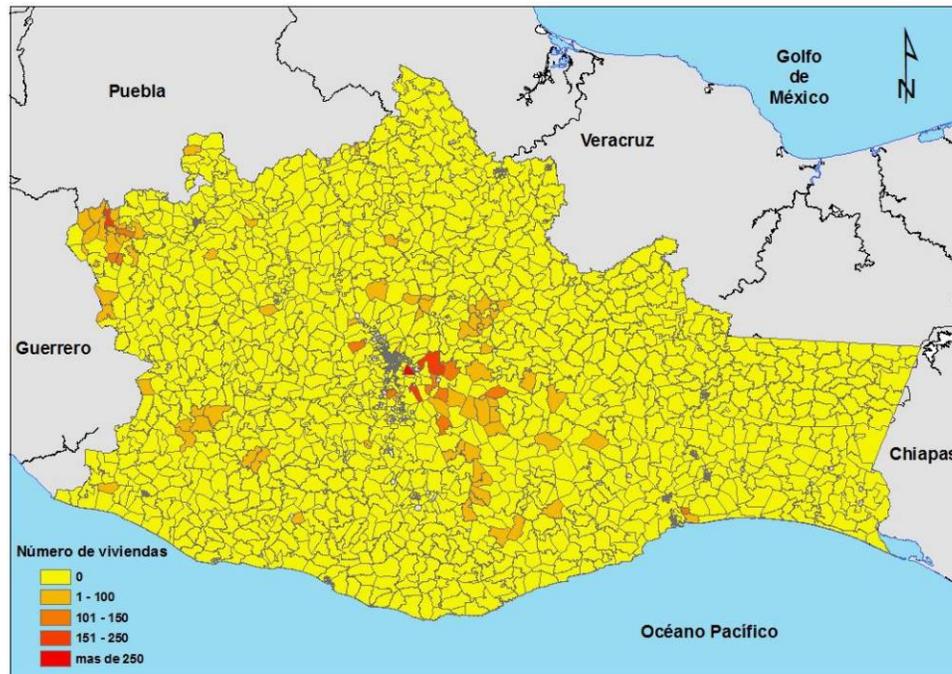
### *Sistema estructural ADOLO1*

En el estado de Oaxaca siguen existiendo construcciones que datan de las décadas de los 50s ó 60s, estas construcciones están hechas con base en muros de adobe con cubiertas ligeras, de teja de lámina o de madera. Aunque en la actualidad este tipo constructivo está casi en desuso, representan un número menor que debe tomarse en cuenta ya que algunas localidades tienen viviendas con este tipo de construcción. En la gráfica de la figura 5.8 se observa que más del 94% de las AGEBs no presentan este tipo de construcción, sin embargo, un 4% de los AGEBs (92) contienen hasta 100 viviendas con estas características. Con la misma información se obtuvo que solo dos AGEBs tienen más de 250 edificaciones con muros de adobe y techumbres ligeras.



**Figura 5.8.** Porcentaje de AGEBs según el número de viviendas ADOL01.

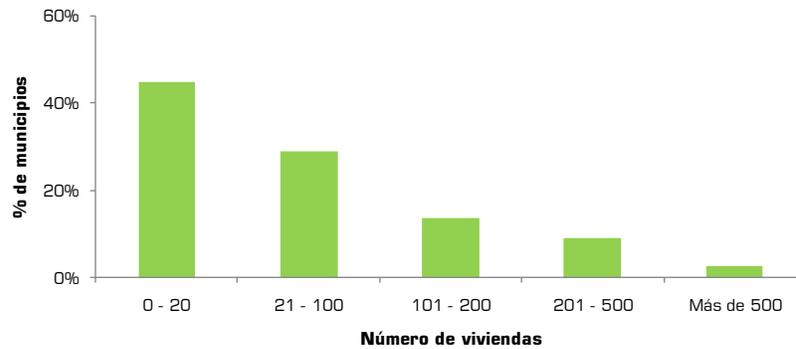
En la figura 5.9 se puede observar, además de lo anteriormente expuesto, que dichas viviendas se concentran en la región de los Valles Centrales, parte en la región de la Mixteca así como en la región del Istmo.



**Figura 5.9.** Distribución de la vivienda ADOL01 por AGEB según su número.

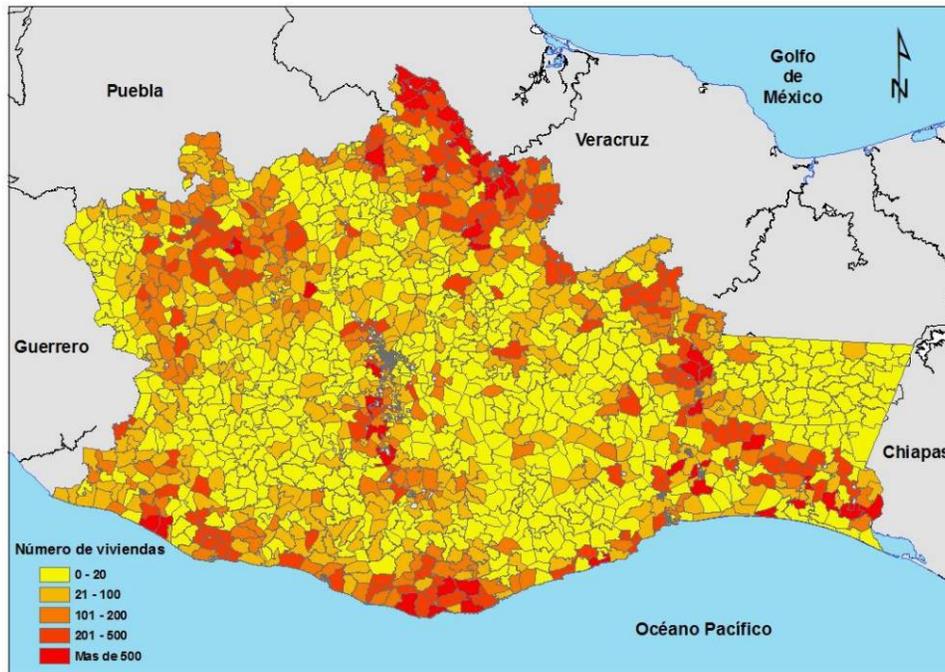
### *Sistema estructural MAMLO1*

Este sistema estructural se ha convertido en uno de los más comunes hoy en día, sin embargo, no representa la mayoría de las viviendas en el estado de Oaxaca. Sobre la distribución de viviendas con este sistema constructivo, se tiene que un 45% de los AGEBs contienen apenas 20 viviendas, un 29% contiene más de 20 pero menos de 100 viviendas y solamente alrededor del 3% de los AGEBs contiene más de 500 edificaciones con estas características.



**Figura 5.10.** Porcentaje de AGEBs según el número de viviendas MAMLO1.

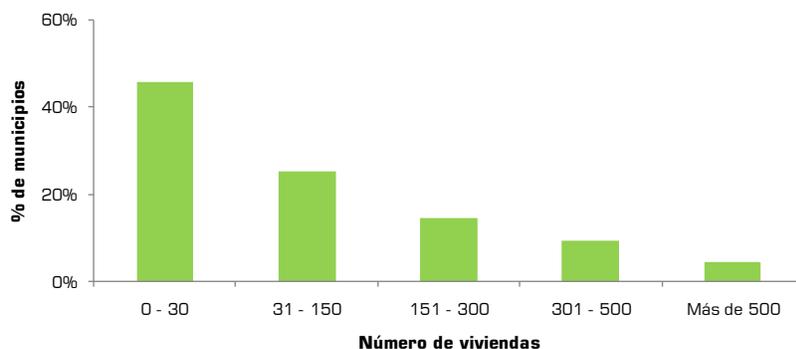
En la figura 5.11 se muestra la distribución de este tipo de sistema estructura en cada uno de los AGEBs, donde se observa que existe una concentración en las regiones de Valles Centrales, Costa, Istmo, Mixteca y Tlaxiaco.



**Figura 5.11.** Distribución de la vivienda MAMLO1 por AGEB según su número.

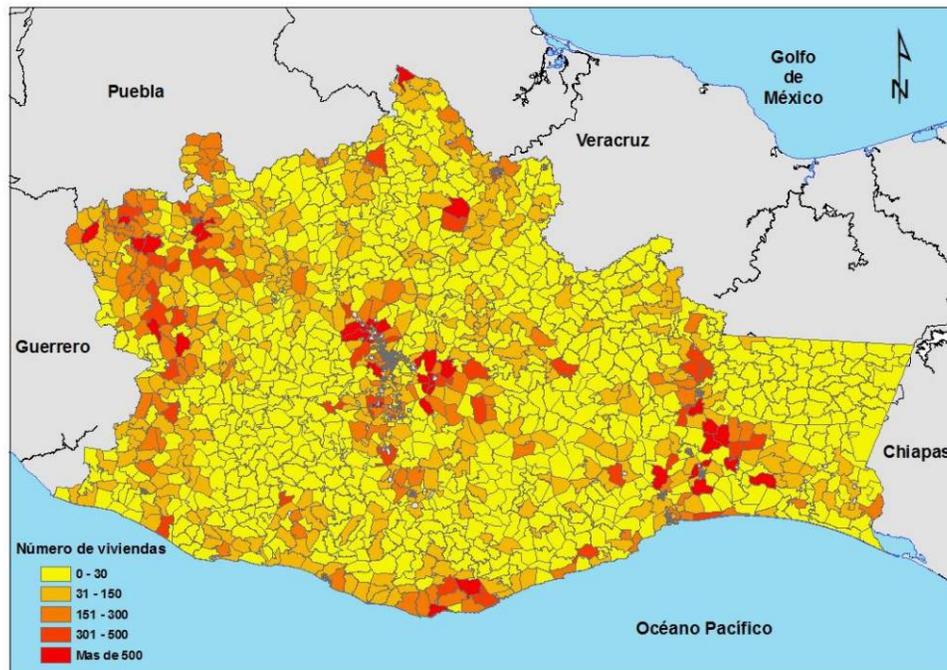
### *Sistema estructural MAMPO1*

La distribución de este tipo de vivienda en el estado se muestra de manera cuantitativa en la gráfica de la figura 5.12, donde se observa que alrededor del 45% de los AGEBs contienen menos de 30 viviendas, un 25% contiene más de 31 edificaciones pero menos de 150 y solamente un poco más del 4% contiene más de 500 casas.



**Figura 5.12.** Porcentaje de AGEBS según el número de viviendas MAMPO1.

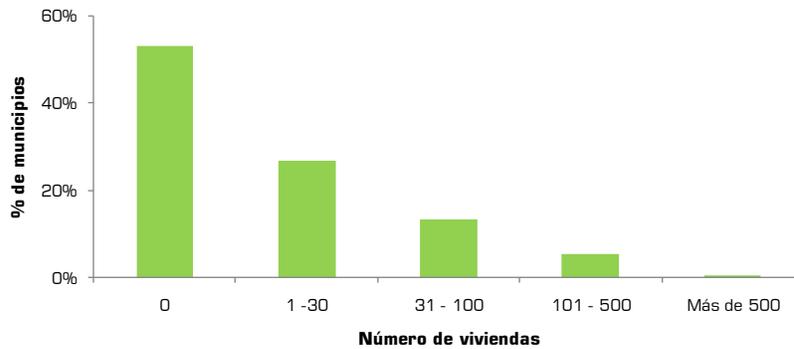
En el mapa de la figura 5.13 se muestra de manera cualitativa la distribución anterior. En este mapa se observa que este tipo de vivienda predomina en la región de los Valles Centrales, Mixteca e Istmo, así como en las zonas urbanas de diferentes regiones.



**Figura 5.13.** Distribución de la vivienda MAMPO1 por AGEBS según su número.

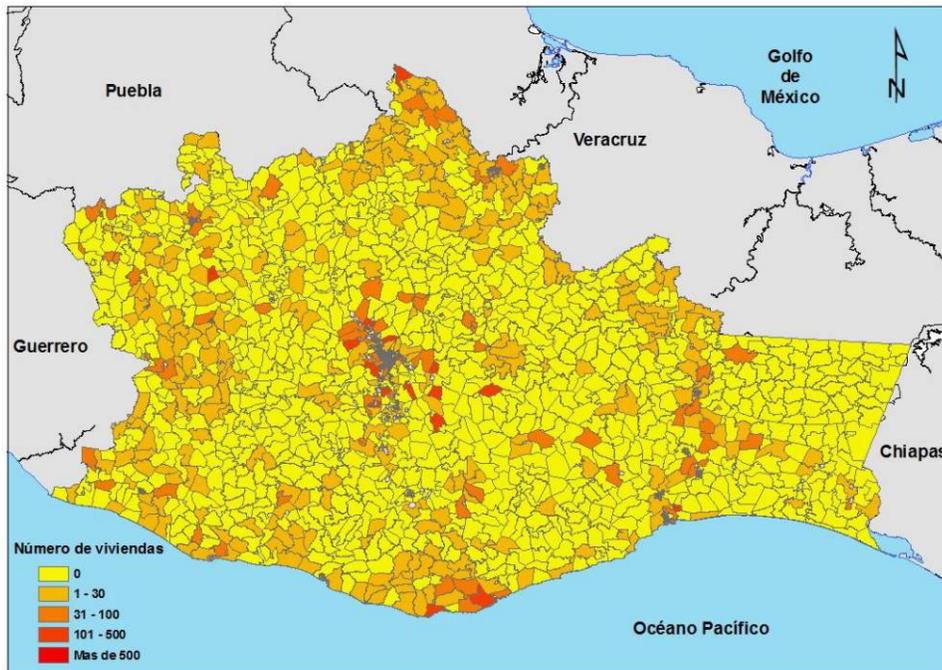
### *Sistema estructural MAMPO2*

Para el caso de las viviendas con dos niveles con muros de mampostería y losa de concreto, existen AGEBS donde no se encuentra este tipo de construcción, esto representa más del 53%; en un 27% de los AGEBS, se considera que existen menos de 30 edificaciones de dos niveles y solamente en un 0.5% existen más de 500 viviendas con este tipo de sistema estructural (figura 5.14).



**Figura 5.14.** Porcentaje de AGEBS según el número de viviendas MAMPO2.

En la figura 5.15 se muestra la distribución geográfica de las AGEBS y el número de edificaciones de tipo MAMPO2 que existen en cada uno de ellas.



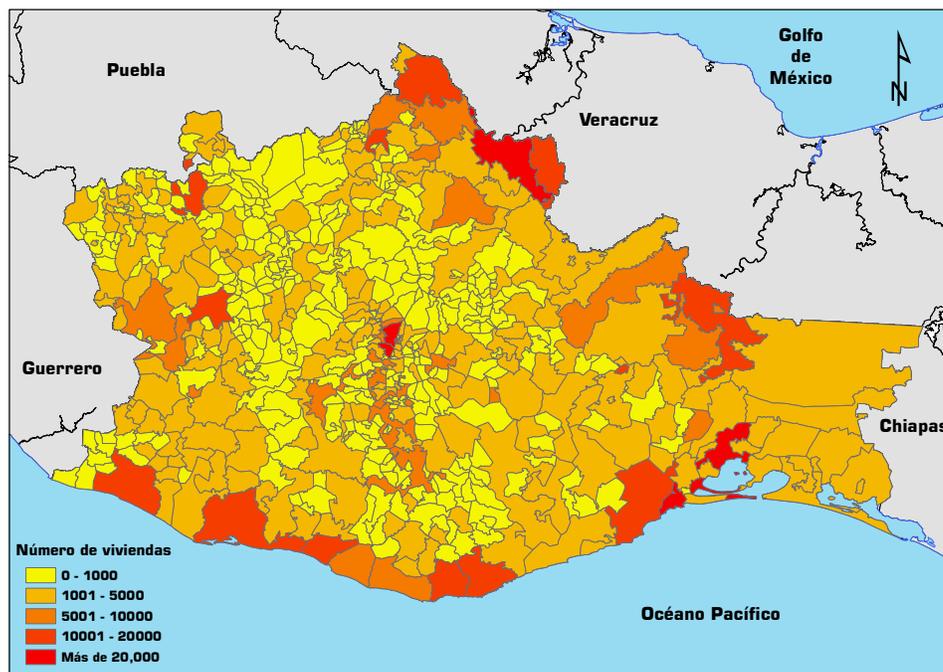
**Figura 5.15.** Distribución de la vivienda MAMPO2 por AGEB según su número.

A pesar de ser una discretización que representa de una manera práctica la distribución de las viviendas en el estado, muchas veces esto puede resultar poco eficiente en aspectos de planificación y toma de decisiones una vez llevado a cabo el cálculo del riesgo. Por tal motivo, a continuación se presenta la distribución de las viviendas a nivel municipal.

### Nivel Municipio

En esta sección se hará una descripción de las estadísticas de los municipios según el número de viviendas por sistema estructural que se encuentran en cada uno de estos. Como ya se mencionó, esta tipo de información tiene el objetivo, en primera instancia, de tener una

primera impresión sobre la distribución de pérdidas económicas debidas a una posible ocurrencia de daños en el estado ocasionados por sismos, tsunamis o marejadas y en segundo término, de mostrar de una manera indirecta, la distribución de la población en función del número de viviendas. En la figura 5.16 se muestra la distribución de los municipios donde se hace una asignación de nivel según el número de viviendas localizadas en cada uno de ellos.

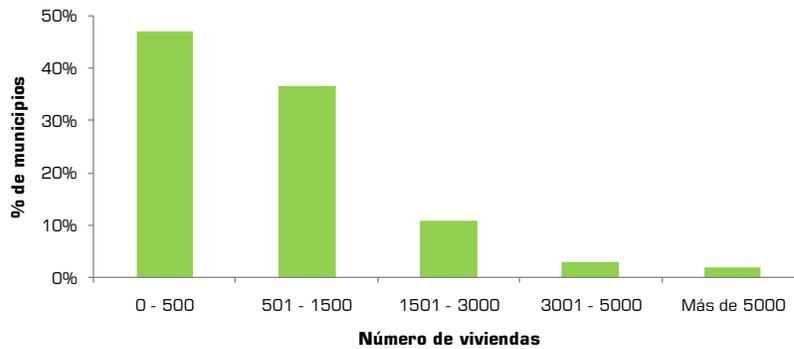


**Figura 5.16.** Distribución de la vivienda por municipio según su número.

En la figura anterior se puede observar que municipios como el de Oaxaca de Juárez, Santa Cruz Xoxocotlán, Salina Cruz, Juchitán de Zaragoza y San Juan Bautista Tuxtepec, presentan una mayor cantidad de viviendas, esto se debe a que en estos municipios existen centros urbanos de importancia donde se desarrollan la mayor cantidad de actividades económicas de esas regiones.

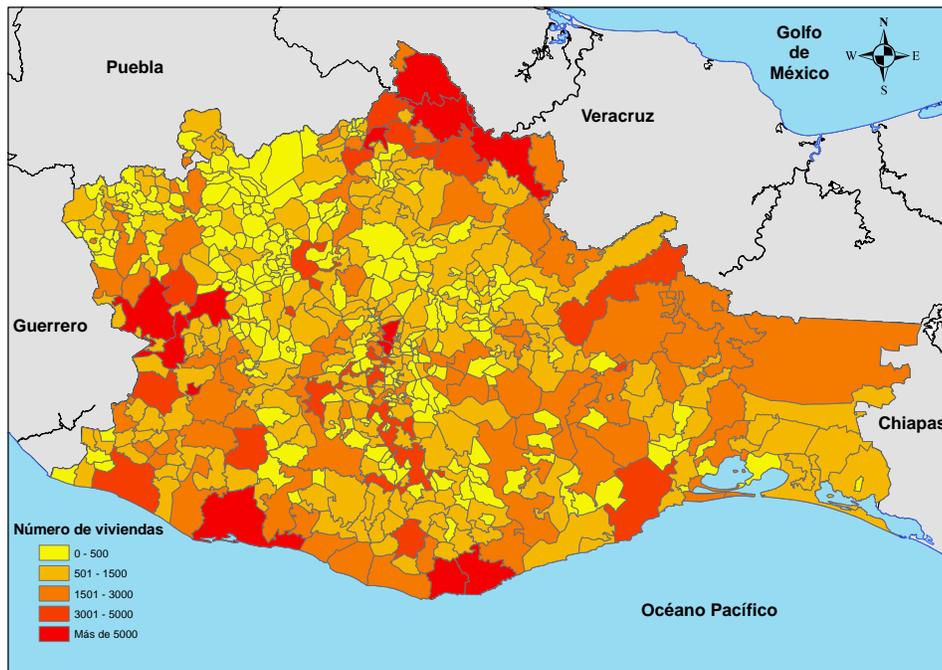
#### *Sistema estructural MADLO1*

De la base de datos obtenida, se determinó que un poco más del 50 % de las viviendas están constituidas por este sistema estructural (figura 5.17), sin embargo, un poco más del 47 % de los municipios de Oaxaca presentan menos de 500 viviendas, lo que indica que una gran cantidad de estas viviendas se encuentra concentrada en pocos municipios (figura 5.17).



**Figura 5.17.** Porcentaje de municipios según el número de viviendas MADLO1.

Para tener una mejor perspectiva de la distribución de este tipo de vivienda, en la figura 5.18 se muestra un mapa de la entidad con la distribución de los municipios y una asignación de color según el número de viviendas con el sistema estructural MADLO1.

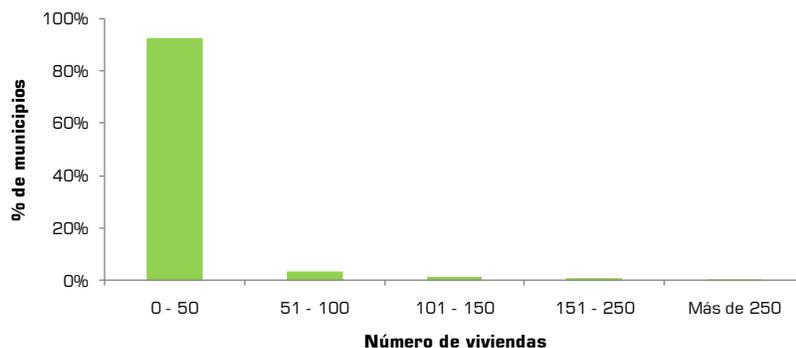


**Figura 5.18.** Distribución geográfica de viviendas MADLO1 por municipio.

#### *Sistema estructural ADOLO1*

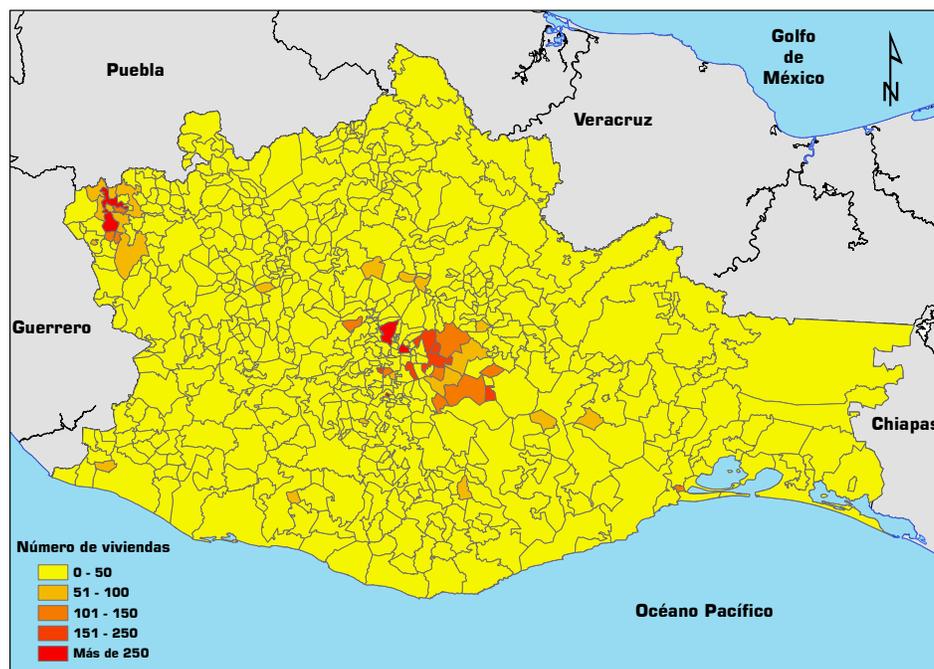
Para este sistema estructural se determinó que menos del 1% de las viviendas consideradas en este estudio están construidas con estas características. Como primera impresión este es un número reducido comparado con el sistema anterior (MADLO1), sin embargo, hay que enfatizar que durante mucho tiempo, este tipo de vivienda la construían aquellas familias con recursos económicos de importancia. Actualmente, este tipo de vivienda ha dejado de construirse sustituyéndose por mampostería.

En la gráfica de la figura 5.19 se observa que más del 92% de los municipios presentan menos de 50 viviendas en su territorio y solo 4 municipios (menos del 1%) contienen más de 250 viviendas de este estilo.



**Figura 5.19.** Porcentaje de municipios según el número de viviendas ADOL01.

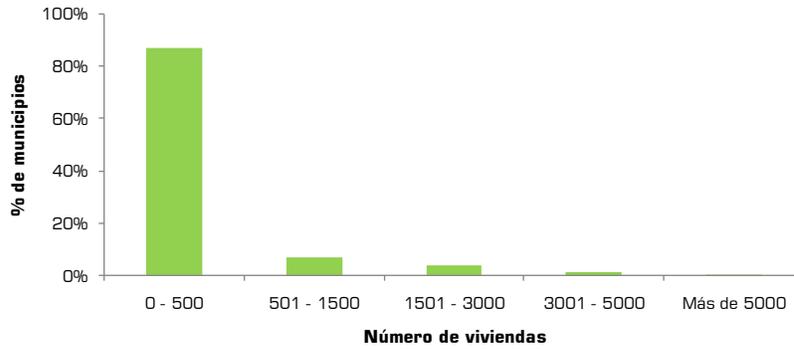
En la figura 5.20 se muestra la distribución de las viviendas en los municipios. En esta figura se puede observar que este tipo de construcción es común en los Valles Centrales y en la región de la Mixteca.



**Figura 5.20.** Distribución geográfica de viviendas ADOL01 por municipio.

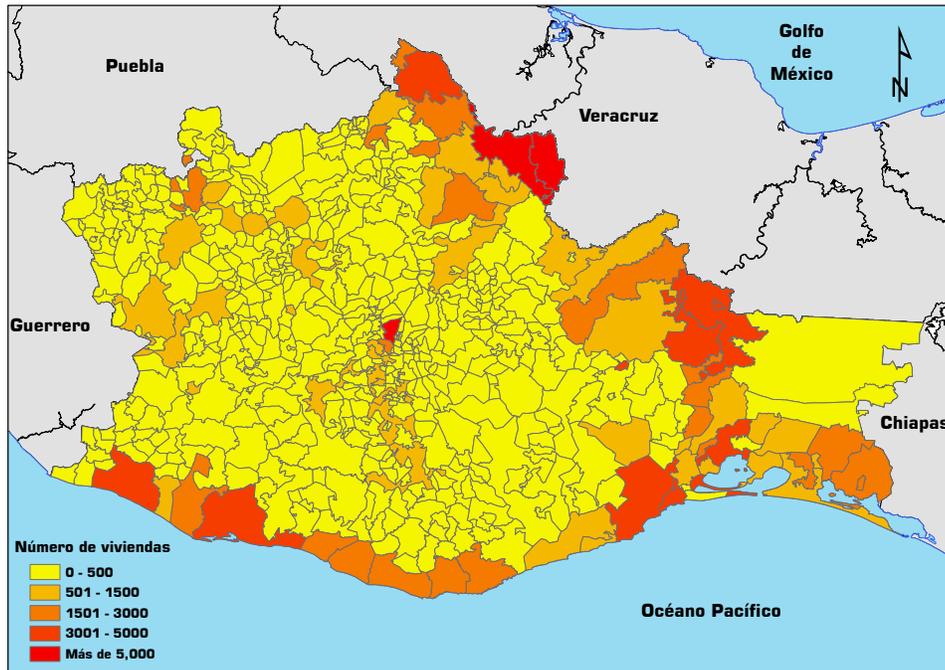
### *Sistema estructural MAMLO1*

Según los datos obtenidos del INEGI, para este sistema estructural se determinó que un poco más del 18% de las viviendas están construidas con este sistema estructural (figura 5.21), de las cuales, la gran mayoría de ellas están localizadas en tres municipios (municipios con más de 5000 viviendas MAMLO1), ya que alrededor del 87% de los municipios cuentan con menos de 500 viviendas con este tipo de sistema estructural.



**Figura 5.21.** Porcentaje de municipios según el número de viviendas MAMLO1.

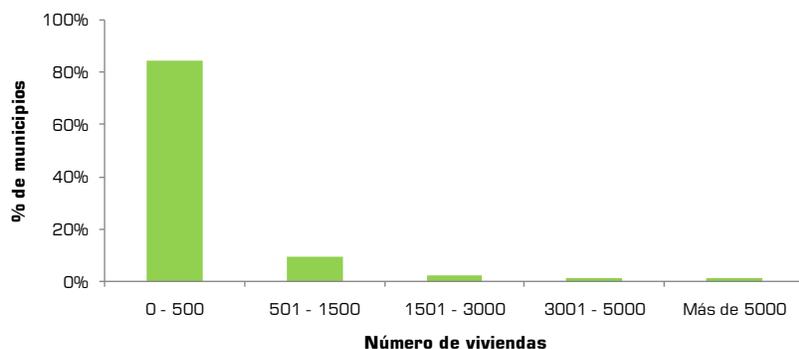
De igual forma que para los otros sistemas estructurales, en la figura 5.22 se muestra qué municipios contienen la gran mayoría de estas viviendas, siendo estos, el municipio de Oaxaca de Juárez, Tuxtepec y Loma Bonita; siguiendo en cantidad de viviendas los municipios de Tehuantepec, Salina Cruz, Pinotepa Nacional, Matías Romero, entre otros.



**Figura 5.22.** Distribución geográfica de viviendas MAMLO1 por municipio.

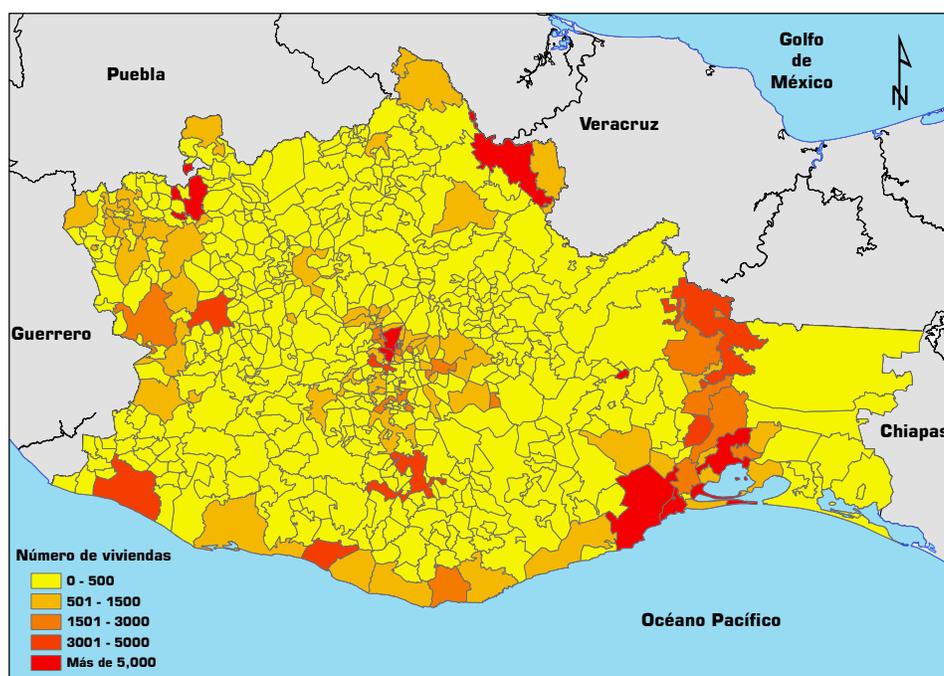
### *Sistema estructural MAMPO1*

Se considera que el 25% de las viviendas en el estado de Oaxaca son de un nivel y están construidas con muros de mampostería y losa de concreto, como se observa en la gráfica de la figura 5.23, alrededor del 85% de los municipios del estado contiene 500 viviendas o menos con estas características y solo 8 municipios contienen más de 5,000 viviendas; esto se debe a que en estos municipios existen zonas urbanas de importancia, por lo tanto, la concentración de población y en consecuencia, de viviendas, es considerablemente mayor que en la zonas urbanas.



**Figura 5.23.** Porcentaje de municipios según el número de viviendas MAMPO1.

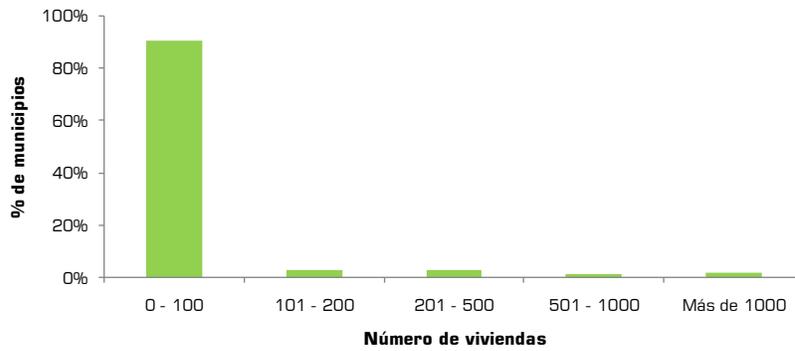
En la figura 5.24 se muestra qué municipios presentan un mayor número de viviendas el sistema estructural MAMPO1.



**Figura 5.24.** Distribución geográfica de viviendas MAMPO1 por municipio.

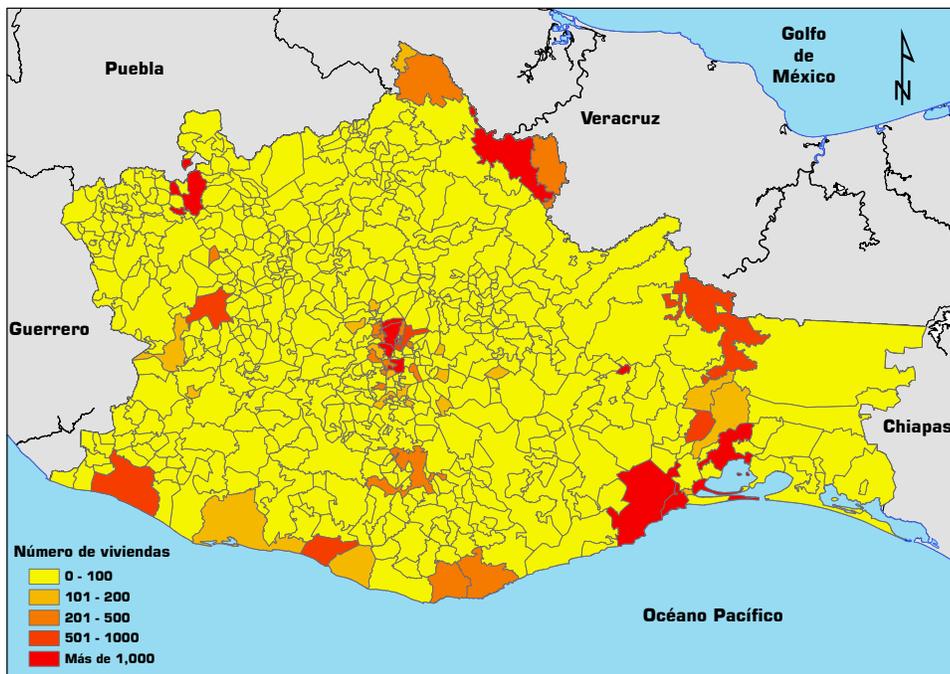
### *Sistema estructural MAMPO2*

El último sistema estructural que se consideró para viviendas corresponde a edificaciones de dos niveles con muros de mampostería y losa de concreto. Este sistema estructural representa un poco más del 5% de las viviendas oaxaqueñas (figura 5.25), esto se debe a que, por cuestiones económicas y de espacio, en los últimos años la generalidad de las nuevas viviendas se han construido en dos niveles. Lo anterior se refleja en la figura 5.25, pues más del 90% de los municipios cuentan con menos de 100 edificaciones de este estilo y solo un 0.5% contienen en su territorio más de 1000 viviendas del tipo MAMPO2.



**Figura 5.25.** Porcentaje de municipios según el número de viviendas MAMPO2.

En la figura 5.26 se observa qué municipios presentan la mayor cantidad de viviendas de mampostería de dos niveles, estos municipios son: Oaxaca de Juárez, San Bartolo Coyotepec, Santo Domingo Tehuantepec, Salina Cruz, Juchitán de Zaragoza, San Juan Bautista Tuxtepec y Huajuapán de León.



**Figura 5.26.** Distribución geográfica de viviendas MAMPO2 por municipio.

## **6. CÁLCULO PROBABILISTA DEL RIESGO**

### **6.1 Introducción**

El análisis probabilista del riesgo tiene como objetivo fundamental determinar las distribuciones de probabilidad de las pérdidas que pueden sufrir en lapsos dados de tiempo los activos expuestos, como consecuencia de la ocurrencia de amenazas naturales (sismo, tsunami, marejada), integrando de manera racional las incertidumbres que existen en las diferentes partes del proceso. La pregunta básica que el análisis probabilista de riesgos debe contestar es: dado que se tiene un conjunto de activos expuestos a los efectos de una o varias amenazas naturales, ¿con qué frecuencia se presentarán pérdidas que superen un valor dado?

Puesto que la frecuencia de los eventos catastróficos es particularmente baja, queda descartada la posibilidad de contestar la pregunta anterior formulando modelos puramente empíricos del proceso de ocurrencia de estos eventos. Esto obliga a la construcción de modelos probabilistas como el que en este documento se describe.

El procedimiento de cálculo probabilista consiste entonces, en forma resumida, en evaluar las pérdidas en el grupo de activos expuestos durante cada uno de los escenarios que colectivamente describen la amenaza, y luego integrar probabilísticamente los resultados obtenidos utilizando como factores de peso las frecuencias de ocurrencia de cada escenario.

El análisis probabilista de riesgo involucra incertidumbres que no pueden despreciarse y deben propagarse a lo largo del proceso de cálculo. En este documento se describen las bases generales de cálculo para tal fin.

### **6.2 Procedimiento para el análisis de riesgo**

La evaluación de riesgo requiere de tres pasos de análisis, que se describen a continuación:

- Evaluación de la amenaza: para cada uno de los peligros considerados, se define un conjunto de eventos, con sus respectivas frecuencias de ocurrencia, que representan de manera integral la amenaza correspondiente. Cada escenario contiene la distribución espacial de parámetros que permiten construir la distribución de probabilidad de las intensidades producidas por su ocurrencia.
- Definición del inventario de elementos expuestos: debe definirse el inventario de elementos expuestos, el cual debe especificar la localización geográfica del bien expuesto más los siguientes parámetros, que califican el elemento:
  - \* Valor físico o costo de reposición del bien
  - \* Valor humano o número de ocupantes estimado
  - \* Clase estructural a la que pertenece el bien
- Vulnerabilidad de las construcciones: debe asignarse a cada una de las clases estructurales una función de vulnerabilidad para cada tipo de amenaza. Esta función caracteriza el comportamiento de la construcción durante la ocurrencia de fenómenos amenazantes. Las funciones de vulnerabilidad definen la distribución de probabilidad de las pérdidas como función de la intensidad producida durante un escenario específico.

Se definen mediante curvas que relacionan el valor esperado del daño y la desviación estándar del daño con la intensidad del fenómeno.

Tanto las funciones de vulnerabilidad como la descripción de los elementos expuestos se comentaron con mayor detalle en los capítulos anteriores.

### 6.3 Ecuación básica

Considerando el objetivo básico del análisis probabilista del riesgo expuesto anteriormente, es necesario plantear una metodología específica de cálculo de las frecuencias de ocurrencia de niveles específicos de pérdidas asociados a los activos expuestos en lapsos determinados de tiempo y ante la ocurrencia de las amenazas naturales estudiadas.

El riesgo por amenazas naturales se describe generalmente mediante la llamada curva de excedencia de pérdidas que especifica las frecuencias, usualmente anuales, con que ocurrirán eventos en que se exceda un valor determinado de pérdidas. Esta frecuencia anual de excedencia se conoce también como tasa de excedencia, y se puede calcular mediante la siguiente ecuación, que es una de las múltiples formas que adopta el teorema de la probabilidad total:

$$v(p) = \sum_{i=1}^{Eventos} \Pr(P > p | Evento i) F_A(Evento i) \quad (6.1)$$

En la ecuación anterior  $v(p)$  es la tasa de excedencia de la pérdida  $p$  y  $F_A(Evento i)$  es la frecuencia anual de ocurrencia del evento  $i$ , mientras que  $\Pr(P > p | Evento i)$  es la probabilidad de que la pérdida sea superior a  $p$ , dado que ocurrió el  $i$ -ésimo evento. La suma en la ecuación anterior se hace para todos los eventos potencialmente dañinos. El inverso de  $v(p)$  es el periodo de retorno de la pérdida  $p$ , identificado como  $Tr$ .

Como se verá más adelante, la curva de pérdidas contiene toda la información necesaria para describir en términos de probabilidad el proceso de ocurrencia de eventos que produzcan pérdidas.

La pérdida  $p$  a que se refiere la ecuación 6.1, es la suma de las pérdidas que acontecen en todos los bienes expuestos. Es por esto que es conveniente recalcar lo siguiente:

- La pérdida  $p$  es una cantidad incierta, cuyo valor, dada la ocurrencia de un evento, no puede conocerse con precisión. Debe, por tanto, ser vista y tratada como una variable aleatoria y deben preverse mecanismos para conocer su distribución de probabilidad, condicionada a la ocurrencia de cierto evento.
- La pérdida  $p$  se calcula como la suma de las pérdidas que se presentan en cada uno de los bienes expuestos. Cada uno de los sumandos es una variable aleatoria y entre ellos existe cierto nivel de correlación, que debe ser incluido en el análisis.

Con base en la ecuación 6.1, la secuencia de cálculo probabilista de riesgo es la siguiente:

1. Para un escenario, se determina la distribución de probabilidades de la pérdida en cada uno de los bienes expuestos.

2. A partir de las distribuciones de probabilidad de las pérdidas en cada bien, se determina la distribución de probabilidad de la suma de estas pérdidas, tomando en cuenta la correlación que existe entre ellas.
3. Un vez determinada la distribución de probabilidad de la suma de las pérdidas en este evento, se calcula la probabilidad de que esta exceda un valor determinado,  $p$ .
4. La probabilidad determinada en el inciso anterior, se multiplica por la frecuencia anual de ocurrencia del evento, obteniendo con esto, la contribución de este evento a la tasa de excedencia de la pérdida  $p$ .

El cálculo se repite para todos los eventos, con lo que se obtiene el resultado indicado por la ecuación 6.1.

Es importante señalar que la ecuación 6.1 no hace distinción entre eventos que pertenezcan a diferentes amenazas. Es decir, la suma en esa ecuación puede incluir, las tres amenazas que se estudian en este proyecto: sismos, tsunamis y marejadas.

#### 6.4 Incertidumbres

Como se observa en la ecuación 6.1, la pérdida que se presenta en un grupo de bienes expuestos durante un escenario es una cantidad incierta que se debe tratar como variable aleatoria.

Generalmente es impráctico determinar de manera directa la distribución de probabilidad de la pérdida en un bien expuesto condicionada a la ocurrencia de un escenario. En otras palabras, por ejemplo, es impráctico determinar la distribución de probabilidad de la pérdida en un edificio, dado que en un sitio localizado a 100 Km de distancia ocurrió un sismo con magnitud 6.

Por razones metodológicas, la probabilidad de excedencia de la pérdida  $p$ , dado que ocurrió un evento, suele expresarse de la siguiente manera:

$$\Pr(P > p | Evento) = \int \Pr(P > p | I) f(I | Evento) dI \quad (6.2.)$$

El primer término del integrando,  $\Pr(P > p | I)$ , es la probabilidad de que la pérdida exceda el valor  $p$  dado que la intensidad local fue  $I$ ; este término, por tanto, toma en cuenta la incertidumbre que hay en las relaciones de vulnerabilidad. Por otro lado, el término  $f(I | Evento)$  es la densidad de probabilidades de la intensidad, condicionada a la ocurrencia del evento; este término toma en cuenta el hecho de que, dado que ocurrió un evento, la intensidad en el sitio de interés es incierta.

#### 6.5 Estimadores puntuales del riesgo

Como se indicó anteriormente, la curva calculada aplicando la ecuación 6.2 tiene toda la información necesaria para caracterizar el proceso de ocurrencia de eventos que produzcan pérdidas. Sin embargo, en ocasiones es impráctico utilizar una curva completa, por lo que conviene utilizar estimadores puntuales del riesgo que permitan expresarlo con un solo número. Se presentan a continuación los dos estimadores puntuales más comúnmente utilizados.

### **Pérdida anual esperada ( $P_{AE}$ )**

Se trata del valor esperado de la pérdida anual. Es una cantidad importante puesto que indica, por ejemplo, que si el proceso de ocurrencia de eventos dañinos fuera estacionario de aquí a la eternidad, su costo equivaldría a haber pagado la  $P_{AE}$  cantidad anualmente. Por tanto, en un sistema simple de seguro, la pérdida anual esperada sería la prima pura anual justa. La  $P_{AE}$  puede obtenerse por integración de  $v(p)$  o mediante la siguiente expresión:

$$P_{AE} = \sum_{i=1}^{Eventos} E(P|Evento i)F_A(Evento i) \quad (6.3)$$

### **Pérdida máxima probable (PML)**

Se trata de una pérdida que ocurre poco frecuentemente, es decir, que está asociada a un periodo de retorno muy largo (o, alternativamente, a una tasa de excedencia muy baja). No existen estándares universalmente aceptados para definir qué quiere decir “poco frecuentemente”. De hecho, la elección de un periodo de retorno u otro para tomar cierta decisión depende de la aversión al riesgo de quien la está tomando. Generalmente, los periodos de retorno utilizados para definir la  $PML$  varían entre 200 y al menos 1500 años.

## **6.6 Probabilidad de excedencia de valores de pérdida**

La curva de pérdidas,  $v(p)$ , calculada con la ecuación 6.1 indica con qué frecuencia ocurrirán eventos que producirán pérdidas iguales o superiores a una dada,  $p$ . Si suponemos que el proceso de ocurrencia de eventos en el tiempo obedece a un proceso de Poisson, entonces es posible calcular la probabilidad de que la pérdida  $p$  sea excedida en un lapso  $T$ , es decir, en los próximos  $T$  años, con la siguiente expresión:

$$Pe(p, T) = 1 - e^{-v(p)T} \quad (6.4)$$

donde  $Pe(p, T)$  es la probabilidad de que la pérdida  $p$  sea excedida en los próximos  $T$  años.

## **6.7 Análisis de un solo escenario**

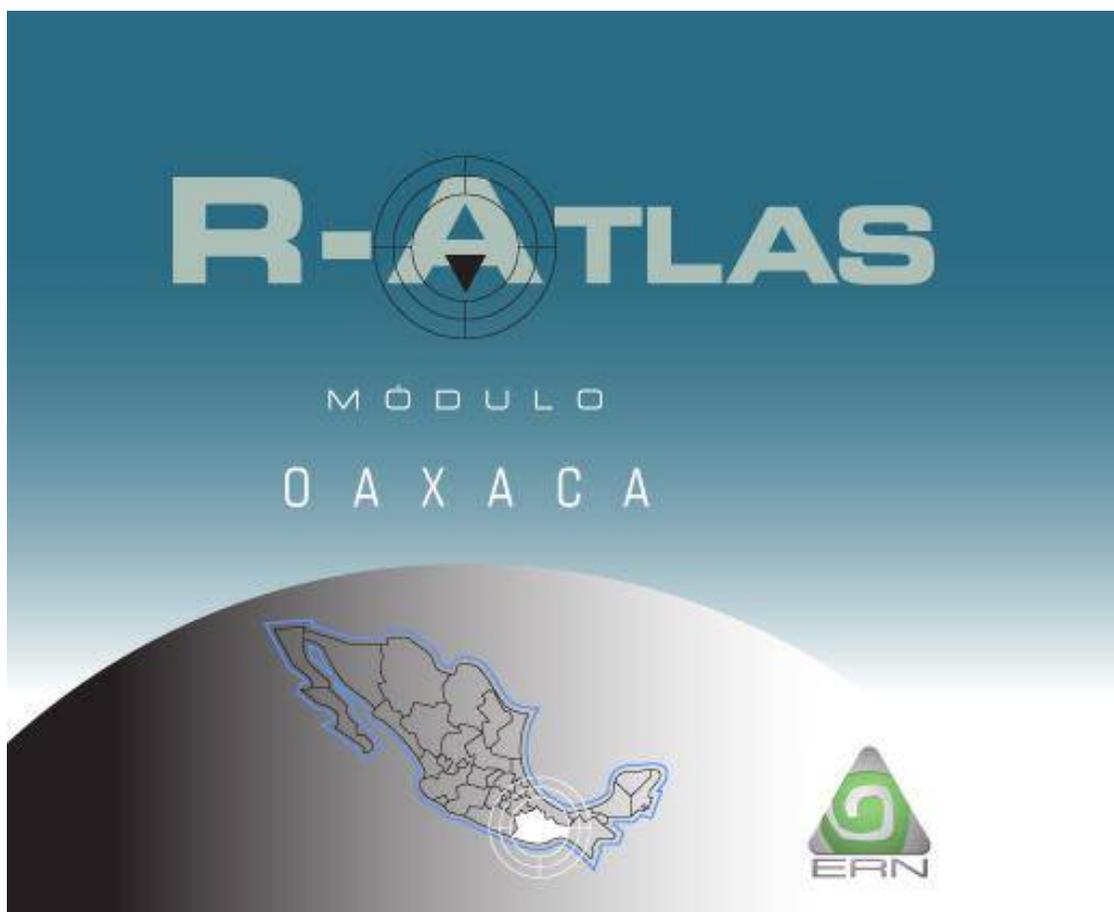
El análisis probabilista de riesgo se realiza normalmente para el conjunto completo de escenarios especificados en las diferentes amenazas. Sin embargo, si así se desea, el análisis puede realizarse para un solo escenario (uno solo de los sumandos en la ecuación 6.1). Si se hace que la frecuencia anual de ocurrencia de este escenario sea 1, la aplicación de la ecuación 6.1 nos conduciría a las probabilidades de excedencia (ya no frecuencias anuales de excedencia) de valores de pérdida  $p$ , dado que el escenario en cuestión ocurrió.

Este caso tiene aplicaciones importantes en el campo de la planeación territorial, ya que sus resultados, mapeados por ejemplo en términos del valor esperado de la pérdida, son fácilmente incorporables en los planes de ordenamiento territorial.

## 7. RESULTADOS OBTENIDOS

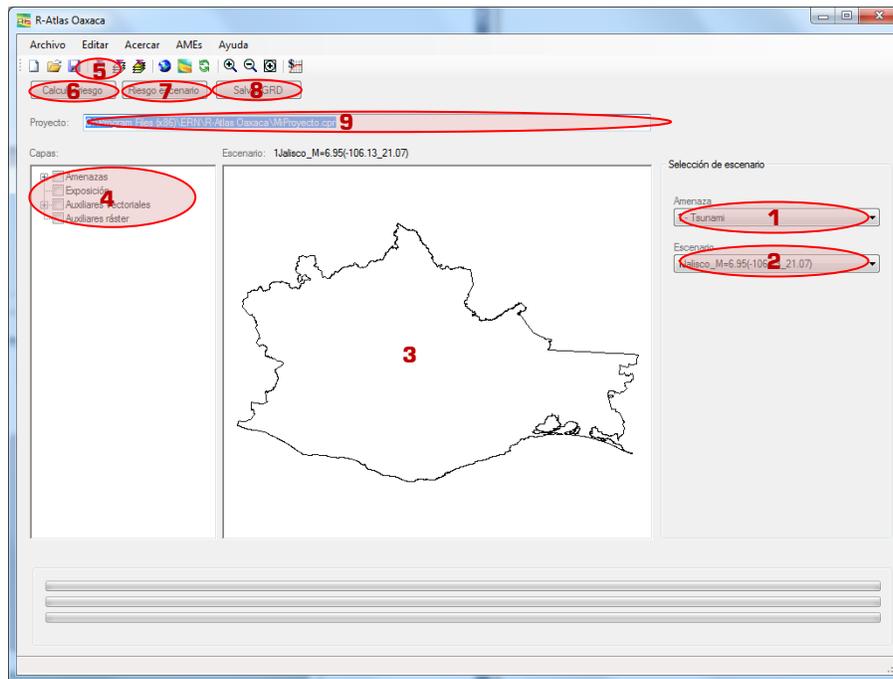
### 7.1 Sistema R-Atlas Oaxaca

Después de haber definido el peligro y la vulnerabilidad de los bienes expuestos en las diferentes bases de datos a emplear, es necesario contar con una herramienta que permita conjugar ambos tipos de información para poder definir el riesgo de una manera formal. Para lograr lo anterior, la empresa ERN, Ingenieros Consultores está diseñando un sistema que conjugue, empleando sistemas de información geográfica, los datos referentes a los peligros que abarca este proyecto así como las distintas bases de datos que definen las edificaciones expuestas y su vulnerabilidad. Este sistema se denomina **R-Atlas, módulo Oaxaca**, el cual es uno de los entregables de este proyecto. En la figura 7.1 se muestra la imagen de entrada del sistema mencionado.



**Figura 7.1.** Imagen de entrada del sistema R-Atlas Oaxaca.

Ya que este programa ha inicializado, se obtiene la pantalla que se presenta en la figura 7.2 en la cual se observan una serie de botones y ventanas que se emplean para el cálculo del riesgo de acuerdo a los resultados que se requieran obtener o la manipulación de la presentación (zoom) que se desee en el momento de ejecución.



**Figura 7.2.** Imagen principal del sistema R-Atlas Oaxaca.

De acuerdo a la figura 7.2, la pantalla principal del sistema R-Atlas Oaxaca contiene los siguientes elementos:

- 1.- Botón donde se define que amenaza visualizar (sismo, tsunami o marejada)
- 2.- Botón que define que escenario, de los que componen al peligro en estudio, se desea visualizar.
- 3.- Pantalla principal donde se visualiza la información deseada (bases de datos, escenarios de peligro, mapas vectoriales de referencia, etc.)
- 4.- Zona donde se define que capas se desea visualizar en la pantalla como base de datos, escenarios de peligro, mapas vectoriales de referencia, topografía, etc.)
- 5.- Botón que se emplea para cargar la base de datos a evaluar.
- 6.- Botón empleado para iniciar el cálculo del riesgo.
- 7.- Botón empleado para realizar el cálculo de pérdidas para un escenario específico del peligro seleccionado.
- 8.- Botón empleado para guardar en formato GRD un escenario específico del peligro seleccionado.
- 9.- Cuadro de texto donde se indica el nombre del proyecto que se quiere guardar, el cual incluirá toda la información cargada en la sesión de trabajo.

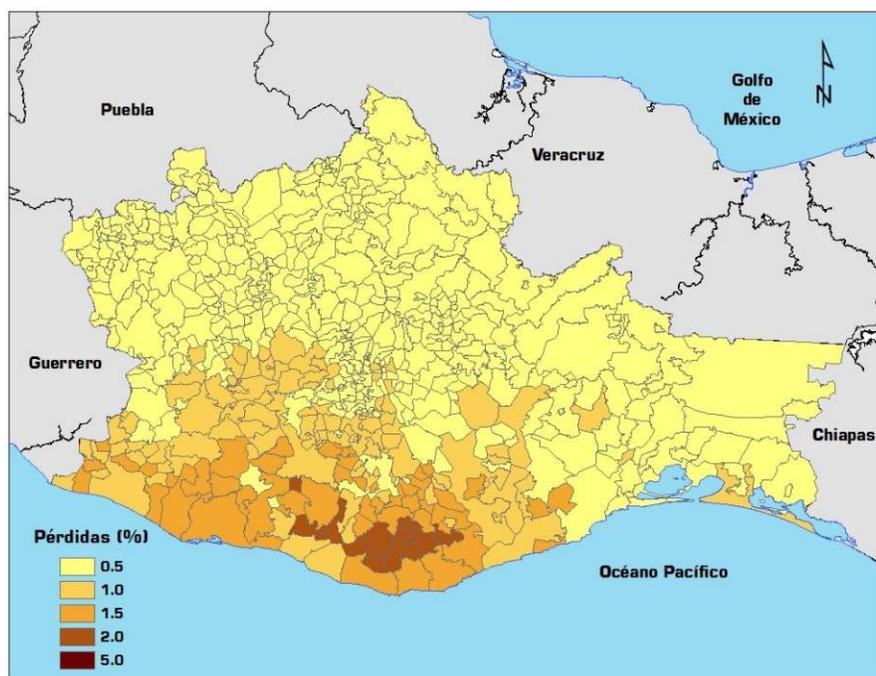
Con el sistema anterior es posible obtener resultados que se pueden mostrar en diferentes niveles de discretización, esto según las necesidades u objetivos que se deseen cubrir.

Los resultados que se muestran a continuación corresponden al porcentaje de pérdida ocurrido en los municipios debido a los peligros sísmicos y por tsunami en términos de los valores expuestos en cada uno de dichos municipios.

## 7.2 Resultados a nivel municipal

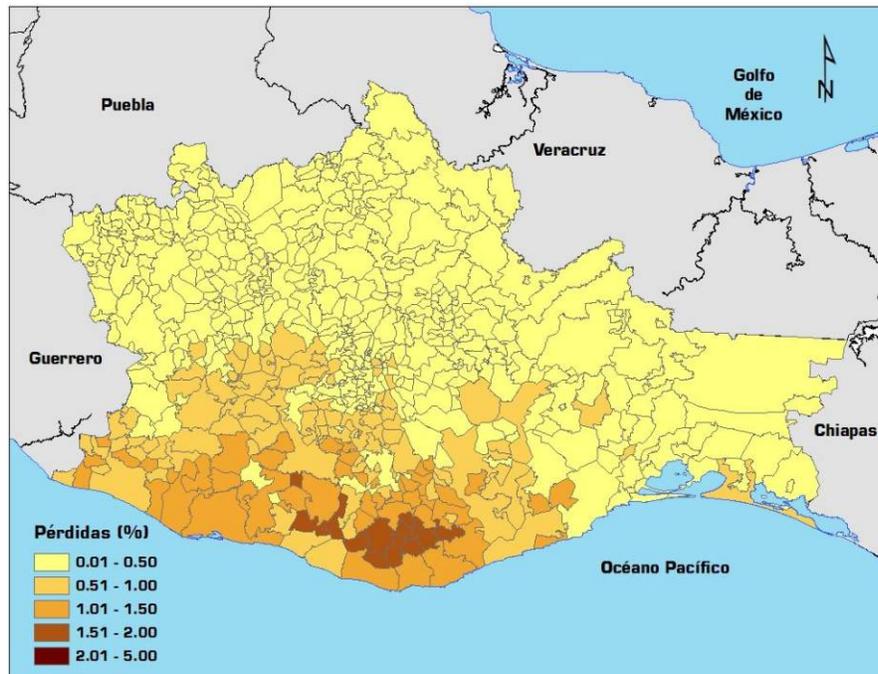
### Resultados con base en la Pérdida Anual Esperada

En la figura 7.3 se muestran los resultados obtenidos de normalizar la pérdida anual esperada obtenida para los peligros mencionados anteriormente entre el valor expuesto en cada uno de los 570 municipios que conforman al estado de Oaxaca.

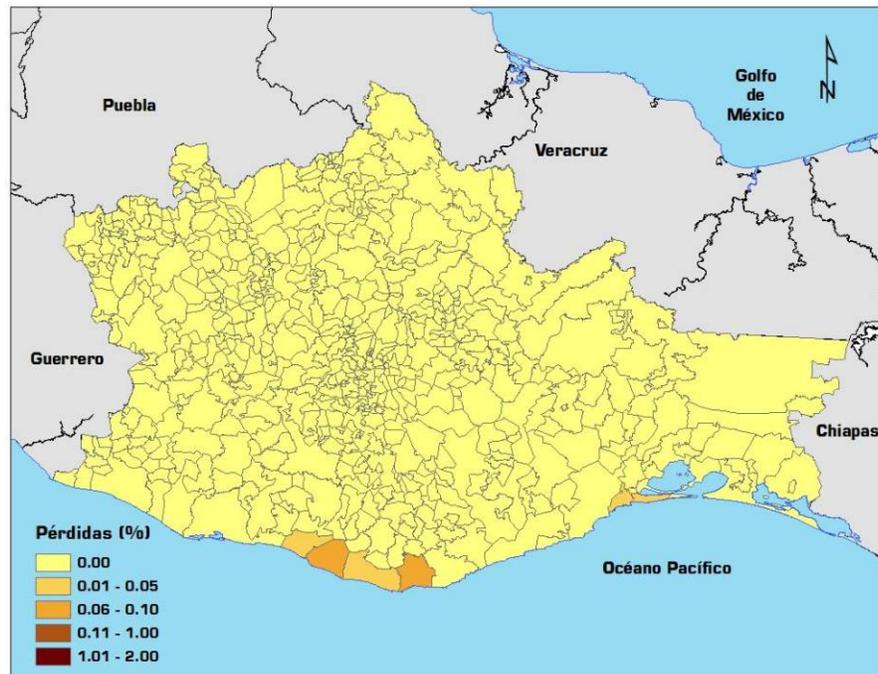


**Figura 7.3.** Porcentaje de pérdida anual esperada a nivel municipal.

La figura anterior es una herramienta de considerable valor, pues con ella se puede determinar, a simple vista, cuáles son los municipios que se verían más afectados ante las amenazas estudiadas, sin embargo, siempre es necesario saber de manera específica cuál es la influencia de cada uno de ellos en las pérdidas que se pueden presentar en los diferentes municipios. Debido a esto, en las figuras 7.2 y 7.3 se muestran los porcentajes de las pérdidas anuales esperadas en los municipios para las amenazas de sismos y tsunami.



**Figura 7.4.** Porcentaje de pérdida anual esperada a nivel municipal debido a la amenaza sísmica.



**Figura 7.5.** Porcentaje de pérdida anual esperada a nivel municipal debido a la amenaza por tsunami.

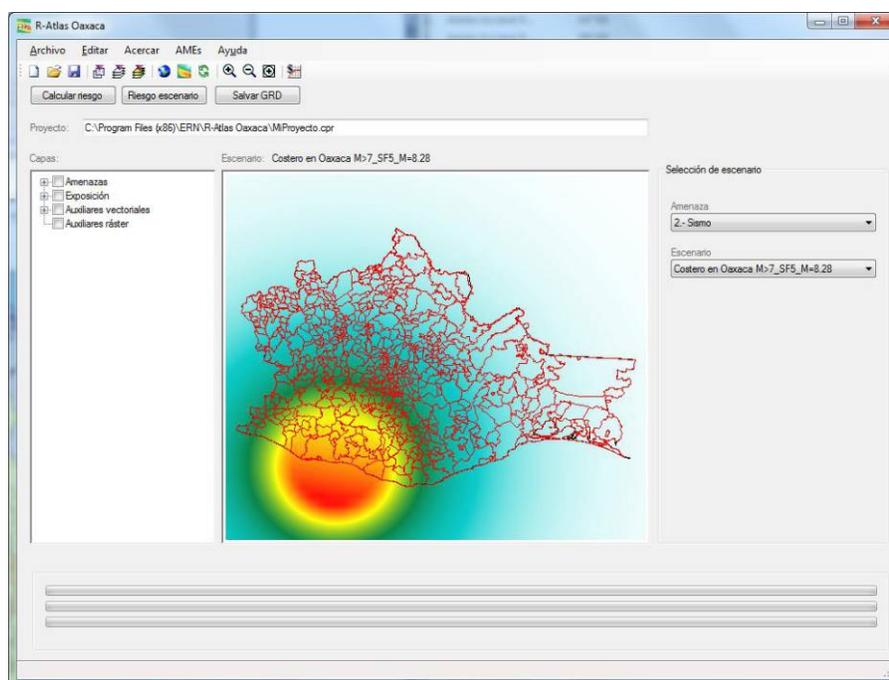
*Resultados con base en la Pérdida por Escenarios sísmico con Ms=8.28*

Los resultados mostrados anteriormente son de gran ayuda para poder definir planes a largo plazo que ayuden a las autoridades competentes y a la población involucrada a reducir las posibilidades de la ocurrencia de daños y por lo tanto, de desastres. Sin embargo, es de igual

importancia estar preparado con medidas a corto plazo que ayuden a minimizar las pérdidas, así como también, a orientar los recursos necesarios para una pronta respuesta en caso de la ocurrencia de un fenómeno extraordinario. Debido a esto, es necesario tener una idea de cómo sería la distribución de los daños dada la ocurrencia de fenómenos específicos.

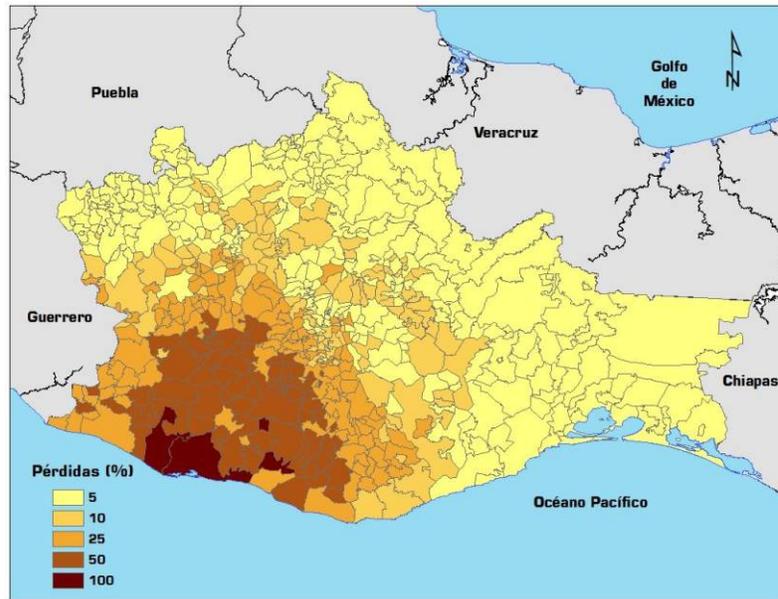
Con base en lo anterior, en esta sección se muestra la distribución de los porcentajes de pérdidas en caso de la ocurrencia de escenarios específicos de sismos y tsunamis.

En la figura 7.6 se ilustra el uso del sistema **R-Atlas Oaxaca** para simular la ocurrencia de un sismo de subducción en la costa oaxaqueña con una magnitud  $M_s=8.28$ . En esta figura se observa la atenuación de las aceleraciones del suelo con un cambio de color que va desde el rojo (zona de máximas aceleraciones) hasta un azul tenue (zona de aceleraciones imperceptibles).



**Figura 7.6.** Ocurrencia de sismo de subducción con  $M_s=8.28$ .

Una vez definido el escenario (evento sísmico) a estudiar, se hace una estimación de las pérdidas esperadas dado este evento sísmico. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 7.2.5

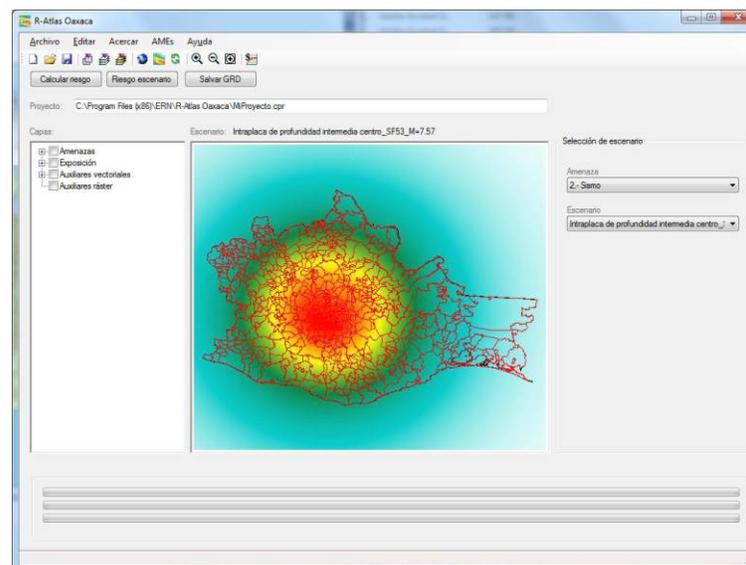


**Figura 7.7.** Distribución de pérdida ocasionada por un sismo de subducción con  $M_s=8.28$ .

Si se comparan las pérdidas estimadas dada la ocurrencia del evento sísmico anterior con aquellos definidos por la Pérdida Anual Esperada, se observa que estos últimos son considerablemente menores y esto se debe al significado que tiene cada uno de estos valores, pues no hay que olvidar que esta última es el promedio de las pérdidas que se espera ocurran en el Estado de manera anual, por todos los eventos sísmicos que se puedan presentar.

#### *Resultados con base en la Pérdida por Escenarios sísmico con $M_s=7.57$*

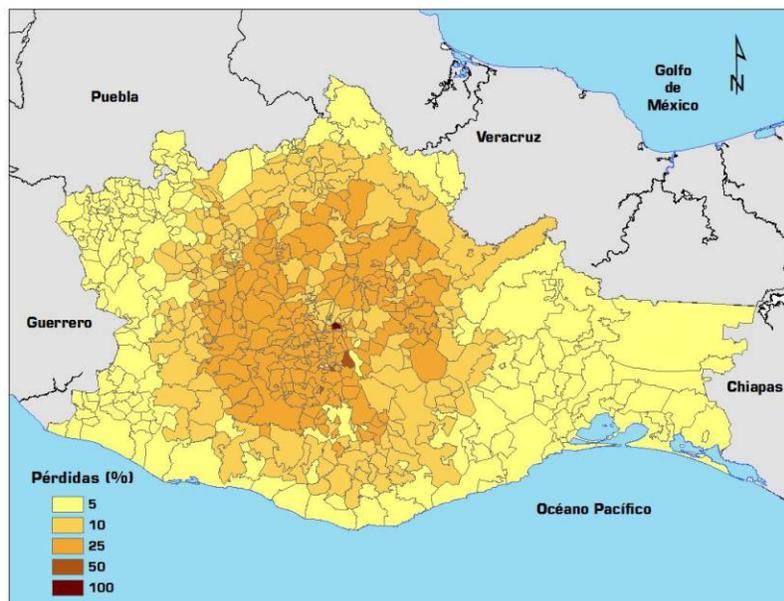
Con la misma finalidad que el apartado anterior, empleando el sistema R-Atlas Oaxaca, se simula la ocurrencia de un sismo de profundidad intermedia con magnitud  $M_s = 7.57$ , el cual se considera que ocurre en el centro del estado (figura 7.8).



**Figura 7.8.** Ocurrencia de sismo de profundidad intermedia con  $M_s=7.57$ .

Los resultados de pérdida obtenidos de evaluar en el sistema R-Atlas Oaxaca la ocurrencia de un escenario como el anterior se muestran en la figura 7.9.

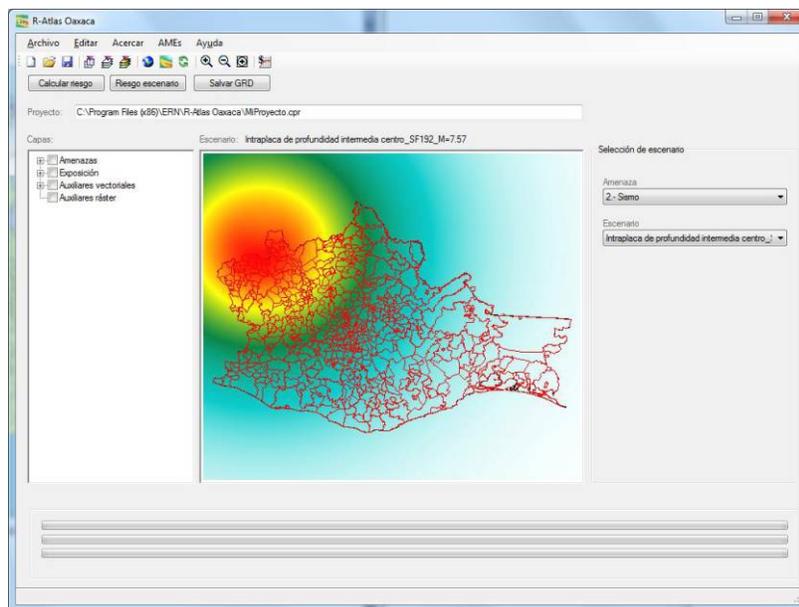
Nótese que la distribución de los daños y la intensidad de estos es menor si se comparan con el escenario de subducción de magnitud  $M_s = 8.28$



**Figura 7.9.** Distribución de pérdida ocasionada por un sismo de subducción con  $M_s=7.57$ .

### Resultados con base en la Pérdida por Escenarios sísmico con $M_s=7.57$

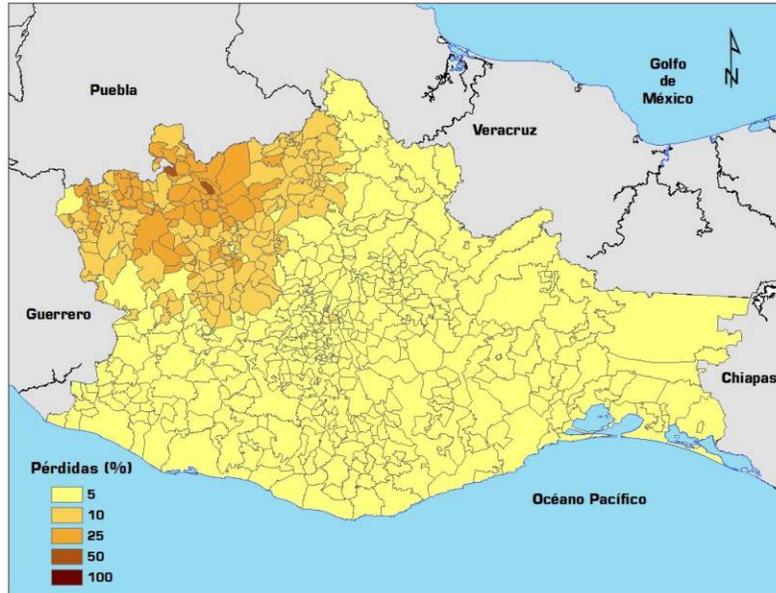
Por último, se presenta otro escenario sísmico intraplaca de profundidad intermedia con magnitud  $M_s = 7.57$ , el cual se considera que ocurre entre Puebla y Oaxaca (figura 7.10).



**Figura 7.10.** Ocurrencia de sismo de profundidad intermedia con  $M_s=7.57$ .

Los resultados de pérdida obtenidos de evaluar en el sistema R-Atlas Oaxaca la ocurrencia de un escenario como el anterior se muestran en la figura 7.11.

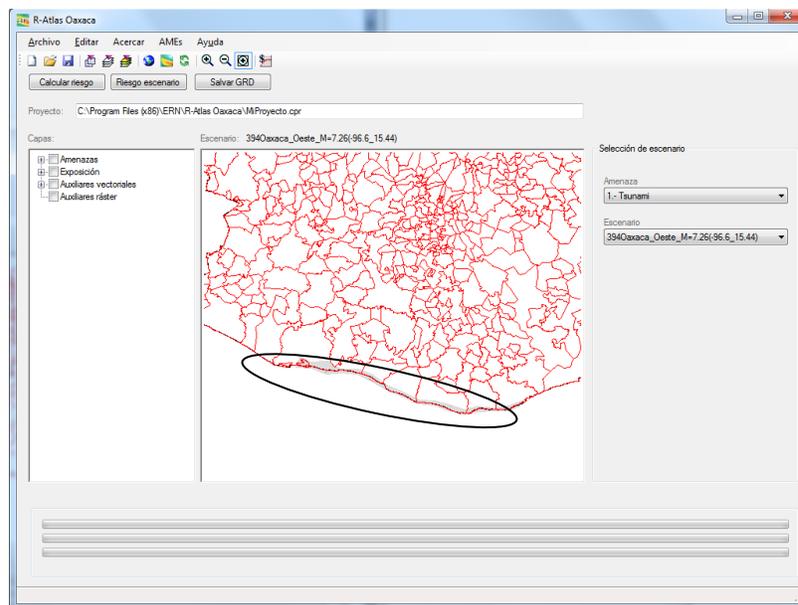
Nótese que la distribución de los daños y la intensidad de estos es menor si se comparan con el escenario de subducción de magnitud  $M_s = 8.28$



**Figura 7.11.** Distribución de pérdida ocasionada por un sismo de subducción con  $M_s=7.57$ .

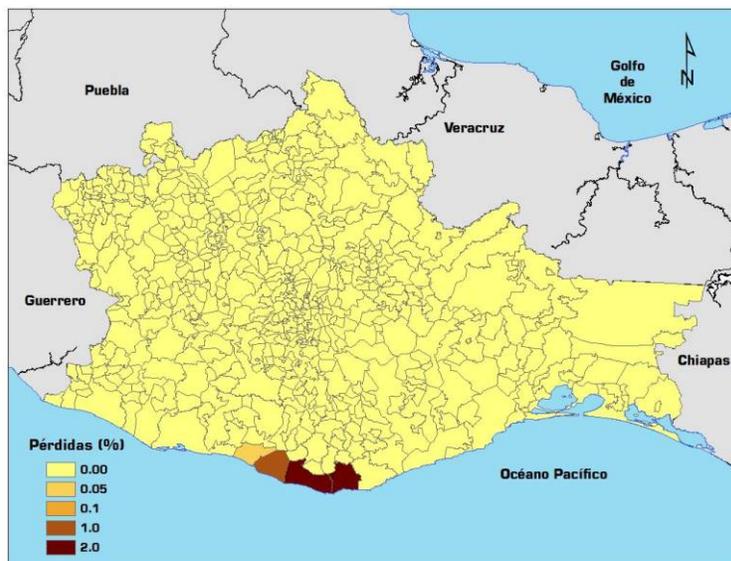
### Resultados con base en la Pérdida por Escenario de tsunami 1

Los resultados que se muestran a continuación corresponden a la presencia de un tsunami en las costas centrales de Oaxaca simulado con el sistema R-Atlas Oaxaca (figura 7.12).



**Figura 7.12.** Ocurrencia de tsunami en costa central.

Las pérdidas correspondientes a este fenómeno se muestran en la figura 7.13 donde se observa que solamente tres son los municipios que presentarían afectaciones debido a un evento como el ilustrado en la figura 7.13.

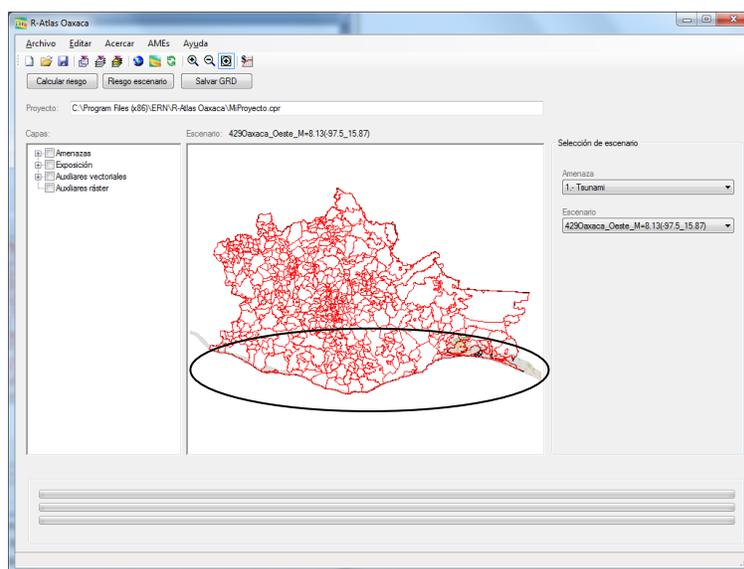


**Figura 7.13.** Distribución de pérdida ocasionada por un tsunami en costas centrales.

Es importante observar que la intensidad del porcentaje de pérdidas originadas por un tsunami son relativamente menores que aquellas ocasionadas por la ocurrencia de un evento sísmico. Esto se debe principalmente a la ubicación de las edificaciones, pues la gran mayoría de ellas no se encuentran en la línea de costa.

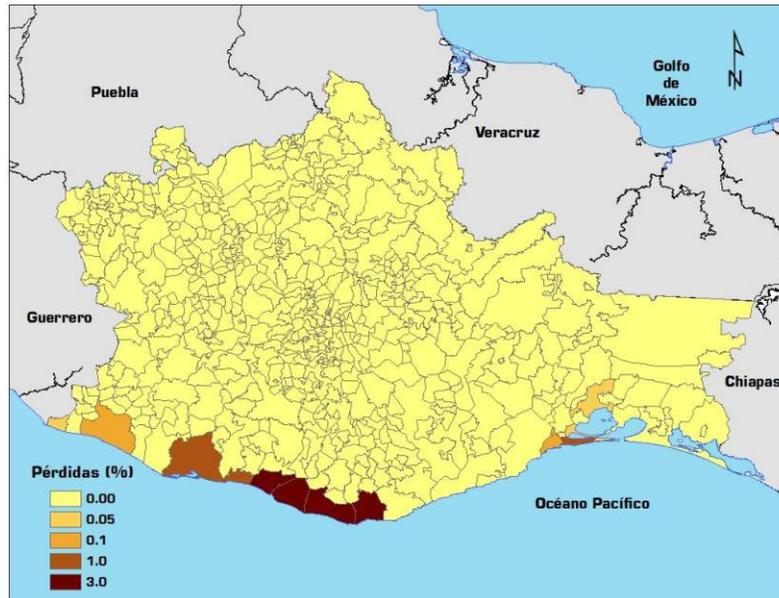
#### *Resultados con base en la Pérdida por Escenario de tsunami 2*

Los resultados que se muestran a continuación corresponden a la presencia de un tsunami originado por un sismo de magnitud  $M_s = 8.13$  afectando toda la costa de Oaxaca (figura 7.14).



**Figura 7.14.** Ocurrencia de tsunami en costa central.

Las pérdidas correspondientes a este fenómeno se muestran en la figura 7.15.



**Figura 7.15.** Distribución de pérdida ocasionada por un tsunami en costas centrales.

## 8. REFERENCIAS

Amante, C. and B. W. Eakins, (2009), ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 19 pp.

Arroyo, D., García, D., Ordaz, M., Mora, M., y Singh, S.K. (2010), Strong Ground-Motion relations for Mexican Interplate Earthquakes, *Journal of Seismology*.

Atkinson, G. M. y Boore D. M., (2003), Empirical ground-motion relations for subduction-zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, pp. 1703–1729.

Boore, D.M., (1983). Stochastic simulation of high-frequency ground motion based on seismological models of radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73, pp.1865-1884.

Brune, J.N., (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic S waves from earth, *J. Geophys. Res.* 75, pp. 4997-5009.

CENAPRED (2001) Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México.

Dysthe, K. B. y Trulsen, K., (2003), The evolution of an evolution equation, *Progress in nonlinear science*, Vol. II "Frontiers of Nonlinear Physics", pp. 125-138.

García, D., Singh, S.K., Herráiz, M., Pacheco J.F. y Ordaz, M.(2004), Inslab Earthquakes of Central Mexico: Q, Source Spectra, and Stress Drop, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95, pp. 2272 – 2282.

García, D., Singh, S.K., Herráiz, M., Ordaz, M. y Pacheco J.F. (2005), Inslab Earthquakes of Central Mexico: Peak Ground-Motion Parameters and Response Spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95, pp. 2272 – 2282.

Gobierno del Estado de Oaxaca (2003), Atlas estatal de riesgos, Tomos I, II y III.

Haskell N. A., (1962), Crustal reflection of plane P and SV waves, *J. Phys. Earth.*, No. 67, pp. 4751-4767.

Haskell N. A., (1962), Radiation patterns of surface waves from point source in multi-layered medium, *Bulletin of Sismological Society of America* , No.54, pp. 377-393.

Japan's Ministry of Economy, Trade and industry (METI) and NASA. ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) @ 30 meter, June 29, 2009,

Kramer S., (1996), *Geotechnical Earthquake Engineering*, Ed. Prentice Hall.

León J. L., (1976), Acapulco, Gro., Información General acerca del subsuelo de 17 Ciudades de México, *Memorias de la VIII reunión Nacional de Mecánica de suelos*, Tomo II, pp. 1-26.

León J. L., (1976), Oaxaca, Oax., Información General acerca del subsuelo de 17 Ciudades de México, Memorias de la VIII reunión Nacional de Mecánica de suelos, Tomo II, pp. 157-181.

Limaymanta F. M. (2009), Uso de familias espectrales obtenidas con registros de sismos y microtemores para la clasificación de terrenos con fines de diseño sísmico. Aplicación en las ciudades de Veracruz-Boca del Río, Oaxaca y Acapulco, Tesis de Maestría, Posgrado en Ingeniería, UNAM.

McGuire, R.K., Hanks, T.C., (1981), The character of high frequency strong motion, Bull. Seism. Soc. Am. 71, pp. 2071-2095.

Okal, E.A. y C.E. Synolakis, (2004), Source discriminants for near-field tsunamis, Geophys. J. Intl., No. 158, pp. 899-912.

Pavón V. (1998), Los Temblores de Tierra, El poder destructor de los sismos y los volcanes, IMCYC.

Sánchez A. y Farreras S. (1993), Catálogo de Tsunamis (Maremotos) en la Costa Occidental de México, World Data Center for Solid Earth Geophysics, Publication SE-50.

Satake, K. (2002). Tsunamis, en Lee, W., Kanamori, H., Jennings, P., Kisslinger, C., (editores), International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, 81A, pp. 437-451.

Schmidt V., Dahle A., Bungum H., (1997), Costa Rican Spectral Strong Motion Attenuation. Reduction of Natural Disasters in Central America. NORSAR.

Sinh, S.K., Ordaz, M., Anderson, J.G., Rodríguez, M., Quaas, R., Mena, E., Ottaviani, M., y Almora, D. (1989), "Analysis of near source strong motion recordings along the Mexican subduction zone", Bull. Seism. Soc. Am., 79, pp. 1697-1717.

Zúñiga, R. (1994) "Main seismogenic sources zones in Mexico", Reporte Técnico Proyecto 89-0190 IPGH Instituto Panamericano de Geografía e Historia.

## ANEXO A

### FORMATO DE RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE EDIFICACIONES



#### FORMATO DE INSPECCIÓN A INMUEBLES



##### DATOS DE REFERENCIA

No. Inspección:

Nombre o razón social del inmueble: \_\_\_\_\_

Fecha de inspección: \_\_\_\_\_

Responsable de la inspección: \_\_\_\_\_

##### DATOS DE LOCALIZACIÓN

Agencia (si aplica): \_\_\_\_\_ CP (CODIGO\_LOCALIZACION): \_\_\_\_\_

Municipio: \_\_\_\_\_ \* Longitud: \_\_\_\_\_

\* Latitud: \_\_\_\_\_

##### DATOS DE LA UBICACIÓN

Altura entre el nivel del mar y el desplante del edificio (UBI\_ALTURA)

1. <= 5 metros  
 2. >5 y <=10  
 3. > 10

Distancia desde la línea de costa hasta el desplante del edificio (UBI\_DISTANCIA)

metros

\* Rugosidad del sitio:(UBI\_RUGOSIDAD)

1. Campo abierto plano  
 2. Árboles o construcciones dispersas  
 3. Arbolado, lomeríos, barrio residencial  
 4. Muy accidentada, centro de ciudad

\* Topografía del sitio:(UBI\_TOPO)

1. Campo abierto plano  
 2. Promontorio, colinas, montañas

##### DATOS TÉCNICOS DE LA ESTRUCTURA

Para definir el sistema "principal" se puede recurrir a los siguiente pasos:

a. Localizar sitios en los que no se colocó el aplanado o acabados por ejemplo: colindancias, escaleras, bodegas. En estos sitios se pueden observar los elementos principales y el tipo de material. En la medida de lo posible se recomienda retirar los acabados para observar estos elementos.

b. Identificar los elementos estructurales tales como columnas, trabes, losas y muros; sus dimensiones aproximadas y su material. Es muy común que los elementos de acero o muros divisorios ligeros cuenten con recubrimiento que les den apariencia de materiales sólidos. Para definir si estos elementos son sólidos bastará con dar unos ligeros golpes con el puño de la mano y si el sonido que se produce es hueco es muy probable que las trabes y columnas sean de acero y que los muros no contribuyan a la resistencia.

Seleccione el tipo estructural

1. Muros de carga de mampostería  
 2. Marco de concreto  
 3. Marcos y muros de concreto  
 4. Columnas y losas planas de concreto

Otro \_\_\_\_\_

5. Columnas y losas planas de concreto con muros  
 6. Marcos de acero contraventeado  
 7. Marcos de acero con muros de concreto  
 8. Estructura prefabricada de concreto

1. La mampostería puede ser piedra o ladrillo confinada por elementos esbeltos de concreto reforzado (dalas y castillos). Para definir si los muros de carga son el sistema "principal", el inmueble no debe de contar con columnas de mayores dimensiones que el ancho de los muros.

2 y 3. Los marcos de concreto tienen columnas y trabes que son elementos de concreto con dimensiones que sobresalen de los muros y losas. En general los muros son sólo divisorios y no contribuyen a su capacidad de carga a excepción de los muros de concreto los cuales pueden tener espesores diferentes a los de los bloques de ladrillo que generalmente son de 15 o 25 cm.



4 y 5. El sistema de losas planas tienen la característica de que no cuenta con trabes y las columnas soportan directamente la losa. Algunos ejemplos se ilustran en un diagrama del Anexo\*. Es importante definir si los muros con que cuenta la estructura son de concreto siguiendo las recomendaciones del inciso anterior.

6 y 7. Los marcos de acero generalmente tienen recubrimiento que los hace parecer de concreto pero se puede identificar si se observa cuidadosamente las conexiones viga columnas y si tiene contraventeos (ver Anexo\*) del mismo material.

8. Los elementos prefabricados de concreto se caracterizan por tener una excelente apariencia además de que algunos de estos cuentan con cables de acero tensado en su interior.

\* **Tipo de construcción: (ES\_INDUSTRIAL)**

1. Nave Industrial  
 2. Edificio

**Fecha de construcción:**

(EDI\_FECHA\_CONSTRUCCION) \_\_\_\_\_

\* **Uso del inmueble: (EDI\_USO)**

\_\_\_\_\_

\* **Número de pisos: (NUM\_PISOS)**

\_\_\_\_\_

\* **Número de sótanos: (NUM\_SOTANOS)**

\_\_\_\_\_

**Tipo de columnas: (EST\_COLUMNAS)**

1. Concreto  
 2. Acero  
 3. Sin columnas

\* **Tipo de trabes: (EST\_TRABES)**

1. Coladas en el sitio  
 2. Prefabricadas  
 3. Sin trabes

**Tiene muros de concreto? (EST\_MUROS)**

1. Sí  
 2. No

**Tipo de cubierta: (EST\_CUBIERTA)**

1. Ligera (lámina)  
 2. Pesada (concreto)

**Separación de columnas: (EST\_CLAROS)**

1. Cortos < 7 metros  
 2. Medianos > 7 y < 12 metros  
 3. Largos > 12 metros

**Tiene muros prefabricados? (EST\_MUROS\_PRE)**

1. Sí  
 2. No

\* **Tiene contraventeo? (EST\_CONTRAVENTEO)**

1. Sí  
 2. No

**OTRAS CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES**

**Forma de la cubierta: (OTR\_CUBIERTA)**

1. Techo horizontal  
 2. Techo inclinado  
 3. Techo en forma de sierra  
 4. Techo curvo

**Irregularidad en planta? (OTR\_IRRE\_PLANTA)\***

1. Nula  
 2. Poca  
 3. Mucha

**Irregularidad en elevación?**

**(OTR\_IRRE\_ELEVACION)\***

1. Nula  
 2. Poca  
 3. Mucha

**DAÑOS**

**Ha sufrido daños estructurales?**

**(OTR\_DA\_PREVIOS)**

1. No  
 2. Sí, ligeros  
 3. Sí, severos

**Los daños fueron reparados?**

**(OTR\_DA\_REPARADO)**

1. Sí  
 2. No

**Ha sido reforzada la estructura?**

**(OTR\_REFORZADA)**

1. Sí  
 2. No

**Fecha del refuerzo: (OTR\_FECHA) \_\_\_\_\_**



### EXPOSICIÓN DE LA ESTRUCTURA

Tiene área de jardines?(EXP\_JARDINES)

<input type="checkbox"/>	1. Sí
<input type="checkbox"/>	2. No

Se encuentra cerca de: (EXP\_DEBRIS)

<input type="checkbox"/>	1. Postes de luz o teléfono
<input type="checkbox"/>	2. Anuncios espectaculares
<input type="checkbox"/>	3. Árboles
<input type="checkbox"/>	4. Otros
<input type="checkbox"/>	5. Ninguno

Tiene vidrio en la fachada:(EXP\_VIDRIOS)

<input type="checkbox"/>	1. Sí
<input type="checkbox"/>	2. No

Tiene madera en la fachada:(EXP\_MADERA)

<input type="checkbox"/>	1. Sí
<input type="checkbox"/>	2. No

Tiene lámina en la fachada:(EXP\_LAMINA)

<input type="checkbox"/>	1. Sí
<input type="checkbox"/>	2. No

Tiene plástico en la fachada:(EXP\_PLASTICO)

<input type="checkbox"/>	1. Sí
<input type="checkbox"/>	2. No

Tamaño de cristales expuestos:(EXP\_CRISTAL)

<input type="checkbox"/>	1. Chicos < 0.25 m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	2. Medianos > 0.25 y < 1 m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	3. Grandes > 1 m <sup>2</sup>

Tiene algún objeto en azotea que pueda desprenderse  
(Antenas Parabólicas, Anuncios espectaculares,  
Equipo de telecomunicaciones, etc.): (EXP\_AZOTEA)

<input type="checkbox"/>	1. Sí
<input type="checkbox"/>	2. No

### DATOS SOCIOECONÓMICOS

\* Valor de inmueble: \_\_\_\_\_

Material en muros: \_\_\_\_\_

Nivel socioeconómico: \_\_\_\_\_

Material pisos: \_\_\_\_\_

m<sup>2</sup> de construcción: \_\_\_\_\_

\* DATOS OBLIGATORIOS

ANEXO

Número de pisos		Uso del inmueble	
	11 pisos	1 Almacén	11 Escuela
	10 pisos	2 Banco	12 Estacionamiento
	7 pisos	3 Biblioteca	13 Fábrica
		4 Central de Comunicaciones	14 Funeraria
		5 Central Eléctrica	15 Hangar
		6 Centro Comercial	16 Hospital
		7 Comercio	17 Hotel
		8 Depósito de Sustancias Explosivas	18 Industria
		9 Depósito de Sustancias Inflamables	19 Laboratorio
		10 Depósito de Sustancias Tóxicas	20 Librería
		21 Museo	
		22 Oficina Gubernamental	
		23 Oficina Privada	
		24 Restaurante	
		25 Servicios de Emergencia	
		26 Terminal de Transporte	
		27 Tienda de Departamentos	
		28 Vivienda	
		29 Otro	

**Estructura sin traves (Columnas y losas planas de concreto)**

Losa plana sin capiteles      Losa plana con capiteles

Losa plana con ábacos y capiteles      Losa reticular

**Contraventeo**

**Columnas cortas**

**Edificio en esquina**

muro de colindancia      fachada

fachada      columnas

**Irregularidad en Elevación**

Nula

Poca

Mucha

**Irregularidad en Planta**

Nula

Poca

Mucha

**Rugosidad del sitio**

1      2      3      4

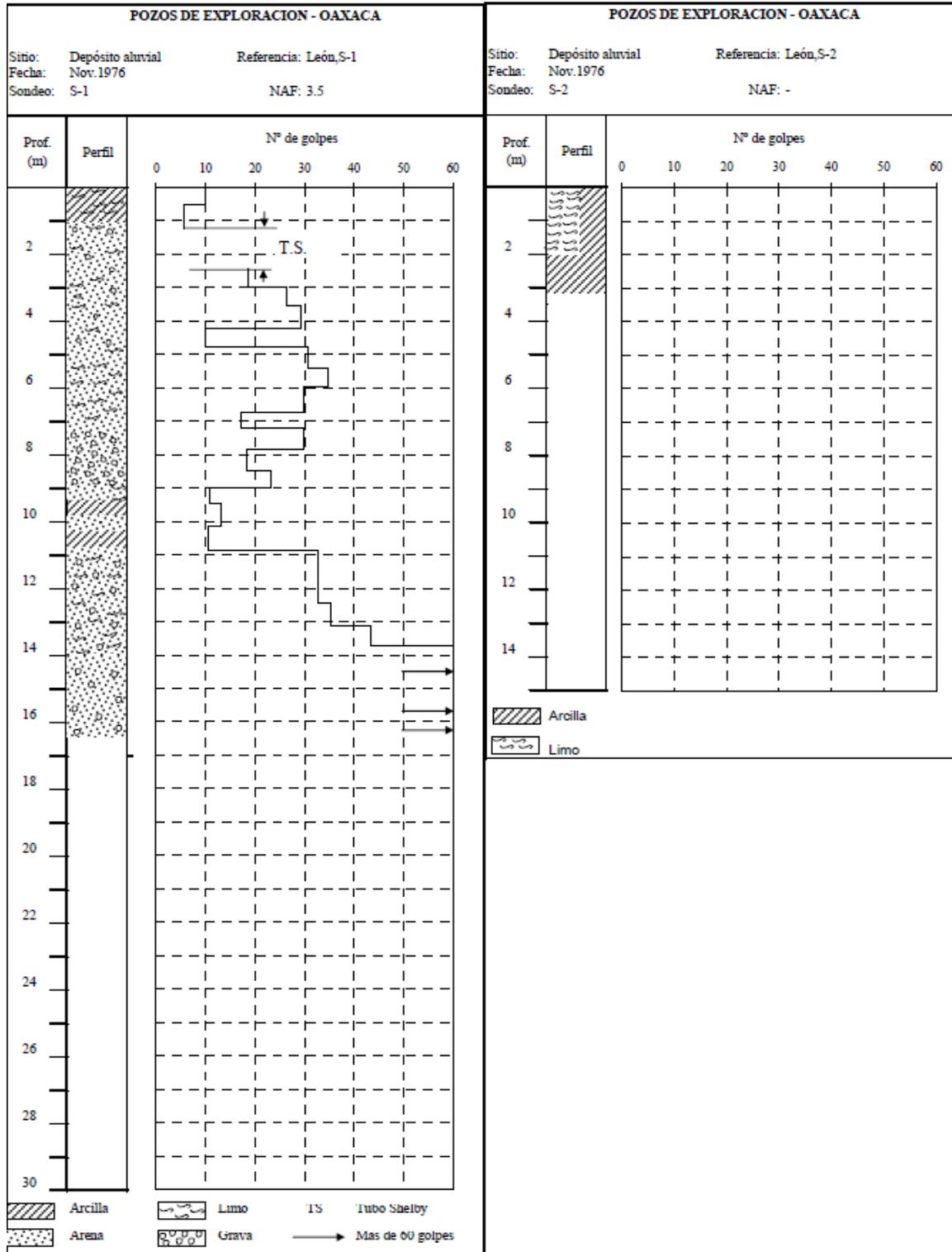
**Topografía del sitio**

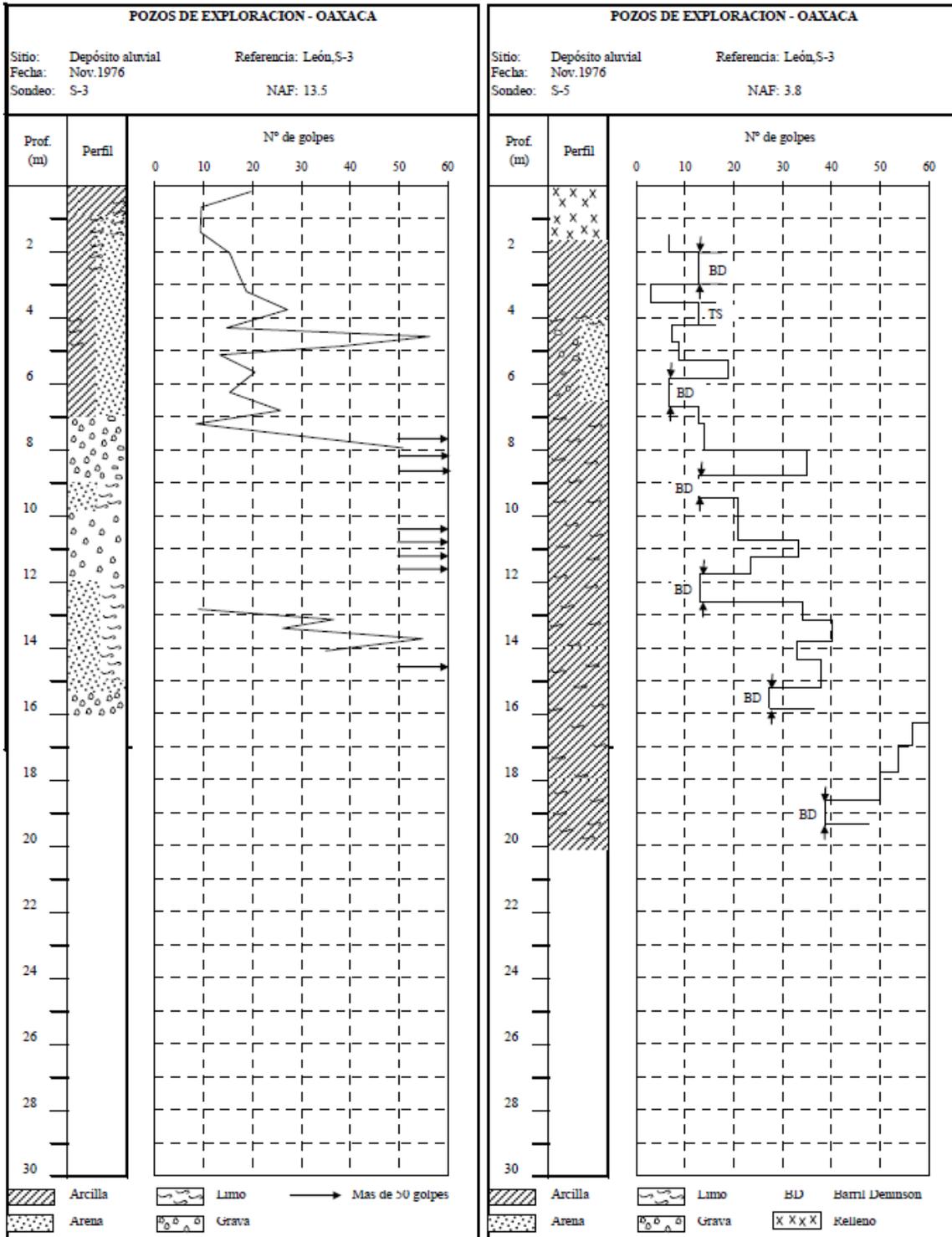
2

1

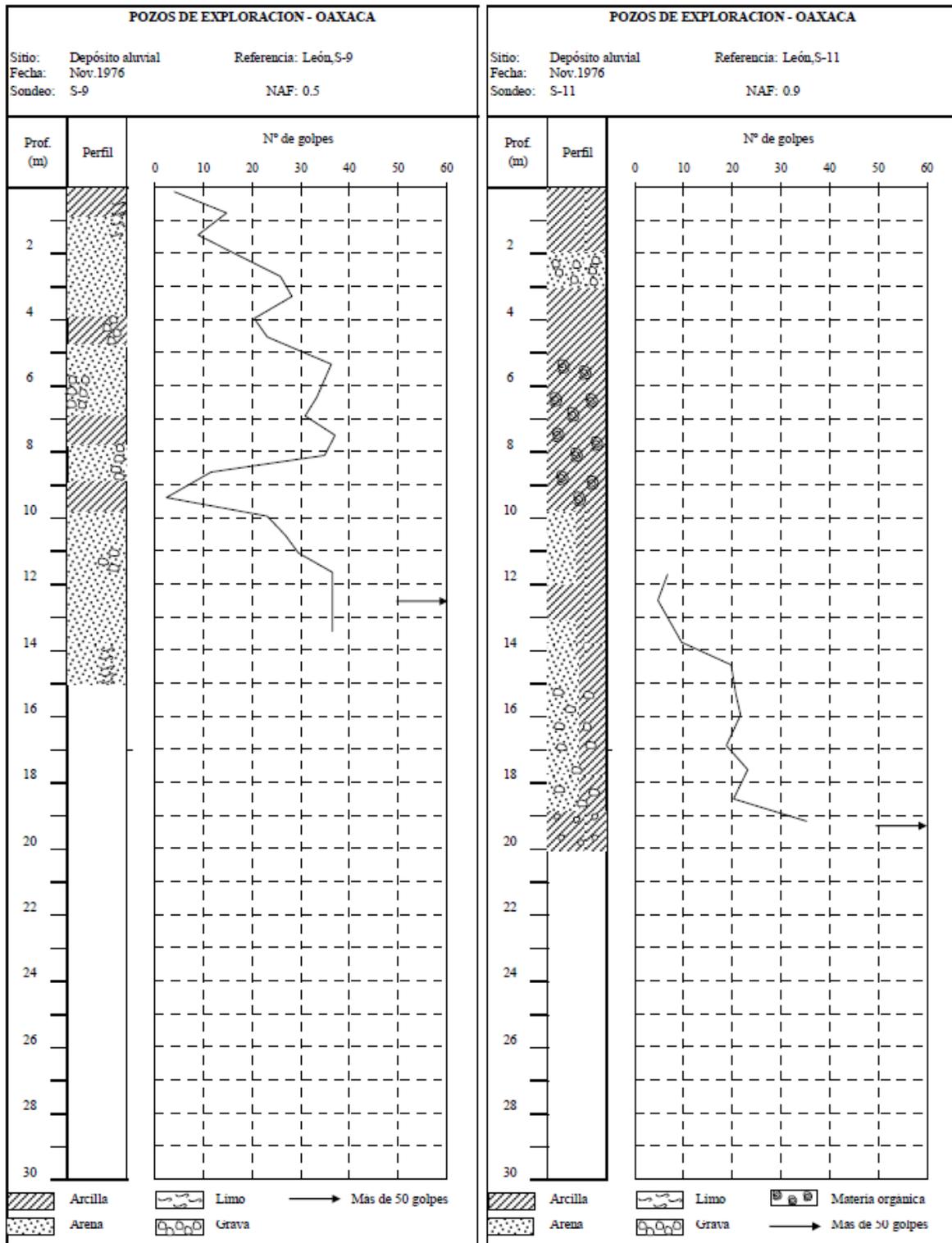
## ANEXO B

### SONDEOS DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (S-1 AL S-2) DE OAXACA





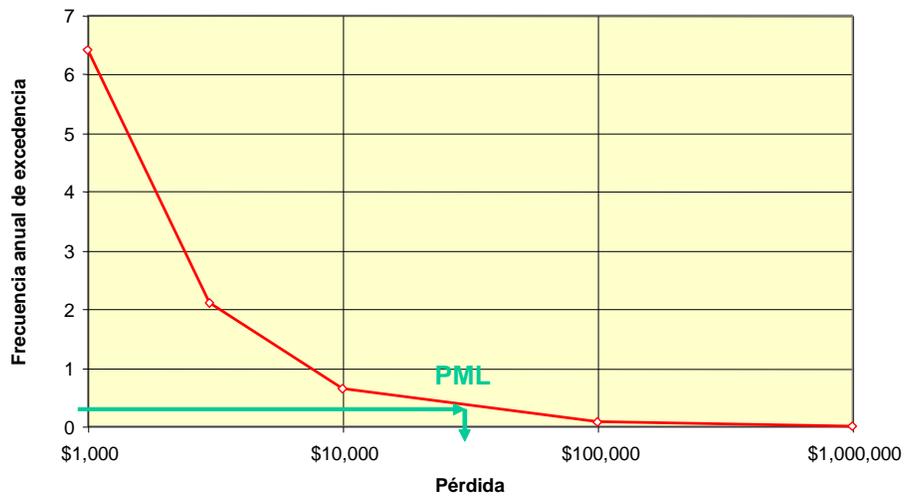




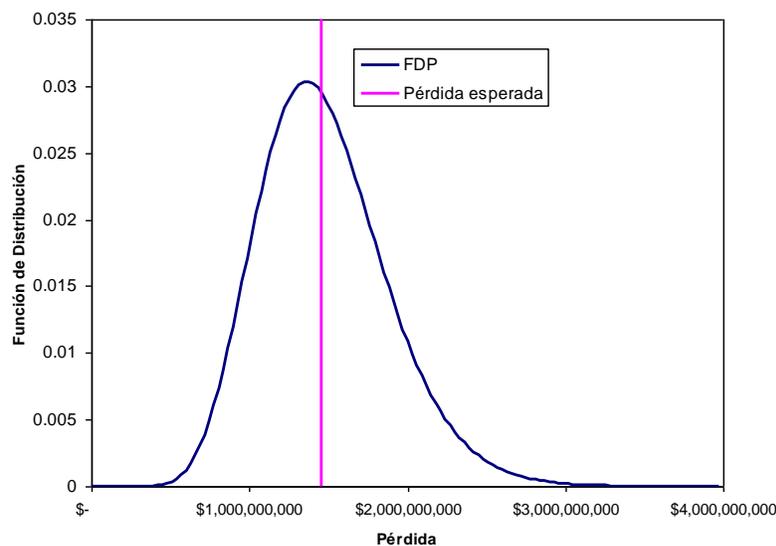
## ANEXO C

### Glosario

**Pérdida Máxima Probable (PML-Probable Maximum Loss).**- Es un estimador del tamaño de las pérdidas máximas que sería razonable esperar en una edificación dada, sometida a un proceso estacionario de ocurrencias de eventos naturales. Esta pérdida generalmente se asociado a frecuencias o probabilidad de excedencia muy bajas.



**Pérdida esperada.**- Es el valor esperado de la pérdida dada una función de distribución de pérdidas para un escenario, este valor representa la pérdida que en promedio se presenta para ese escenario.



**Periodo de Retorno.-** Es el inverso de la tasa de excedencia. Indica el tiempo promedio que debe transcurrir para que se exceda un valor dado.



**Prima Pura.-** Es igual a la pérdida anual esperada. Valor promedio de la pérdida que se tendría en un año cualquiera, suponiendo que el proceso de ocurrencia de los eventos es estacionario y que las estructuras dañadas se les restituye su resistencia inmediatamente después de cada evento.

