



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESTUDIO ESTADÍSTICO DE  
LOS DAÑOS DERIVADOS DEL  
SISMO DEL 7S-2017**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**INGENIERA CIVIL**

**P R E S E N T A**

JAZMÍN LARIOS MARTÍNEZ

**DIRECTOR DE TESIS**

DR. EDUARDO REINOSO ANGULO



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

*Dedicada a:*

*A mi padre **Juan Martínez**, mi héroe, motivación y ejemplo perfecto de constancia, esfuerzo y trabajo. Por el amor, apoyo, protección y enseñanzas a lo largo de mi vida. Vives en mí en cada maravilloso recuerdo.*

*¡Te extraño!*

*A mi madre, **Marisol Martínez Montañez**, la razón de mi existencia, por el amor, apoyo e inspiración día con día, gracias por ser ese sol en mi camino.*

*A mi dulce abuelita, **Rosario Montañez Uribe**, por estar a lo largo de mi vida, brindándome lo mejor de ti.*

*A **Aldo Manrique**, por tus consejos y respaldo, gracias por querer estar aquí.*

*A mi familia **Montañez**, por ese gran cariño e incondicional apoyo, ya que han sido parte de mi evolución como adulto.*

*A todos mis amigos que hice durante mi estancia en la facultad, principalmente a **Pedro, Alina, Aarón y Santos** por su apoyo y amistad sincera.*

*A **Ray**, por tu inmenso amor, cariño y comprensión a lo largo de este tiempo.*

*A cada uno de ustedes, ¡GRACIAS!*

# Agradecimientos

Quiero agradecer al **Dr. Eduardo Reinoso Angulo** por sus comentarios, correcciones y principalmente por sus enseñanzas durante la realización de esta tesis, además de la entera confianza puesta en mí

A mis sinodales **M.I Héctor Guzmán Olguin, M.I José Reginaldo Hernández Romero, M.I Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose** y al **Dr. Mauro Niño** por sus valiosos comentarios que ayudaron a enriquecer el contenido de esta tesis, así como, por sus enseñanzas en las aulas, las cuales me han formado como profesionista.

Al **M.I Luis Manuel Buendía Sánchez** y al **Dr. Pablo Quinde Martínez** por las enseñanzas, correcciones y la paciencia que me brindaron a lo largo de la elaboración de esta tesis.

Al **Instituto de Ingeniería UNAM**, por brindarme el espacio y los medios posibles para la realización de esta tesis.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** y a la **Facultad de Ingeniería** por haberme formado como profesionista.

## Resumen

México es un país de alta actividad sísmica debido a su localización geográfica, por ello se encuentra expuesto continuamente a esta amenaza. El 7 de septiembre de 2017 un sismo de  $M_w$  8.2 tuvo lugar en el golfo de Tehuantepec, se estudió la sismicidad histórica asociada a dicha zona y los aspectos sismológicos. Se identificaron fenómenos derivados tras la ocurrencia del evento principal, como las réplicas, tsunamis y licuación que tuvieron influencia en los daños. Mediante datos recopilados a través de medios electrónicos se recabó información para el estudio estadístico del comportamiento de las estructuras ubicadas en las zonas donde se registraron mayores aceleraciones, así como la influencia de las patologías en la vulnerabilidad de una estructura.

## Abstrac

Mexico is considered a high seismic activity country due to its geographic location, therefore it is continuously exposed into seismic threat. On september 7th, an 8.2  $M_w$  earthquake took place over Tehuantepec Gulf. Seismic activity and seismic aspects were studied in the influenced zone. Several phenomena, such as aftershocks, tsunami, and soil liquefaction, had influence on structural damages, hence were identified after the main event. Throuth electronic complilation of data, collected information about structures located over higher acceleration areas was selected for statistical porpuses, also was developed the influence of patologies over the structure's vunerability.

# Índice

Introducción .....	1
<b>Objetivo .....</b>	<b>1</b>
General: .....	1
Particular .....	1
<b>Alcances y limitaciones .....</b>	<b>1</b>
1. Capítulo 1. Marco Teórico .....	2
<b>1.1. Sismicidad, generalidades.....</b>	<b>3</b>
1.1.1. Tectónica .....	3
1.1.2. Ondas sísmicas .....	4
1.1.3. Magnitud .....	5
1.1.4. Intensidad.....	5
1.1.5. Instrumentación Sísmica .....	7
1.1.6. Algunos fenómenos derivados de la ocurrencia de un sismo .....	7
<b>1.2. Sismicidad en México .....</b>	<b>8</b>
1.2.1. Sismicidad en México al norte .....	9
1.2.2. Sismicidad en México al sur .....	10
<b>1.3. Daños en las estructuras.....</b>	<b>11</b>
1.3.1. Análisis de daño.....	12
1.3.2. Vulnerabilidad .....	16
2. Capítulo 2. Aspectos sismológicos de la zona del Istmo y descripción del evento de estudio .	19
<b>2.1. Tectónica de placas en la zona de estudio.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2. Sismos importantes ocurridos en la zona .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3. Red Acelerométrica .....</b>	<b>30</b>
<b>2.4. Descripción del evento .....</b>	<b>35</b>
2.4.1. Réplicas.....	38
2.4.2. Tsunamis.....	39
<b>2.5. Mapas de intensidades del sismo .....</b>	<b>40</b>
<b>2.6. Demanda sísmica.....</b>	<b>41</b>
3. Capítulo 3. Daños derivados del sismo .....	45
<b>3.1. Descripción de los campos que conforman la base de datos .....</b>	<b>48</b>
<b>3.2. Estadísticas de daños presentados.....</b>	<b>49</b>
3.2.1. Edificios .....	49

3.2.2. Puentes y caminos.....	67
<b>3.3. Licuación .....</b>	<b>73</b>
3.3.1. San Mateo del Mar, Oaxaca .....	73
3.3.2. Centro, Tabasco.....	74
3.3.3. Coatzacoalcos, Veracruz.....	74
<b>3.4. Estadísticas de pérdida de vidas .....</b>	<b>76</b>
<b>3.5. Pérdidas económicas .....</b>	<b>77</b>
<b>3.6. Problemas de salud, seguridad y otros.....</b>	<b>77</b>
Conclusiones .....	81
Referencias.....	84

# Introducción

## Objetivo

**General:** Describir los efectos sobre las estructuras expuestas a este evento en los estados de mayor impacto. Esto a través de la identificación de estructuras dañadas, sus tipos constructivos, uso, número de pisos y las patologías estructurales presentes. Así como las características del sismo del 7 de septiembre de 2017, ocurrido en el golfo de Tehuantepec frente a las costas de Chiapas, en México,

## Particular:

Describir aspectos sismológicos y sismicidad histórica asociada a la zona de estudio.

Estudiar los daños ocurridos a partir de la ocurrencia del sismo del 7 de septiembre de 2017,  $M_w$  8.2.

Identificar y proporcionar estadísticas de patologías observadas en los daños ocasionados por dicho sismo.

Estudiar los fenómenos que pueden desencadenarse después de la ocurrencia de un sismo.

## Alcances y limitaciones

- La zona de estudio abarca un área muy extensa: los estados de la región del Istmo de Tehuantepec que comprende los estados de Oaxaca, Chiapas, Tabasco y Veracruz, además de un par de estados del centro, Puebla y la Ciudad de México, en donde se presentaron algunas afectaciones.
- La recopilación de datos se hizo en gabinete a través de una búsqueda exhaustiva en medios electrónicos e impresos. No se hicieron visitas de campo.
- Los datos recabados para el estudio de esta tesis están sujetos al número de reportes publicados en los diferentes medios.
- La caracterización de las estructuras estudiadas como tipo estructural, estado de daño y patologías estructurales, se realizaron mediante la revisión visual a través de los medios electrónicos e impresos.

## ***Justificación***

Estudiar y estimar riesgos futuros en la zona y ayudar a la mitigación de desastres por dichos eventos, esto debido a que la ocurrencia de un sismo de  $M_w$  7.1 días después, ubicado en la zona del centro del país y en donde también se presentaron daños considerables, hizo que el sismo del 7 de septiembre de 2017 perdiera relevancia y que no se contara con información detallada acerca de los daños o estudios dedicados a este.

# 1. Capítulo 1. Marco Teórico

Poseer un conocimiento general de los temas que se desarrollaran en esta tesis, servirá para entender de mejor manera los aspectos sismológicos del sismo del 07/09/2017, así como el estudio de los daños derivados y la posterior derivación de curvas de vulnerabilidad.

### 1.1. Sismicidad, generalidades

Actualmente se tiene conocimiento sobre el comportamiento del interior de la Tierra gracias a numerosos estudios científicos que se han basado principalmente en la propagación de las ondas sísmicas (Rosenblueth, E., 1985). Esto permitió determinar su composición, la cual se divide en diferentes capas, (Figura 1).

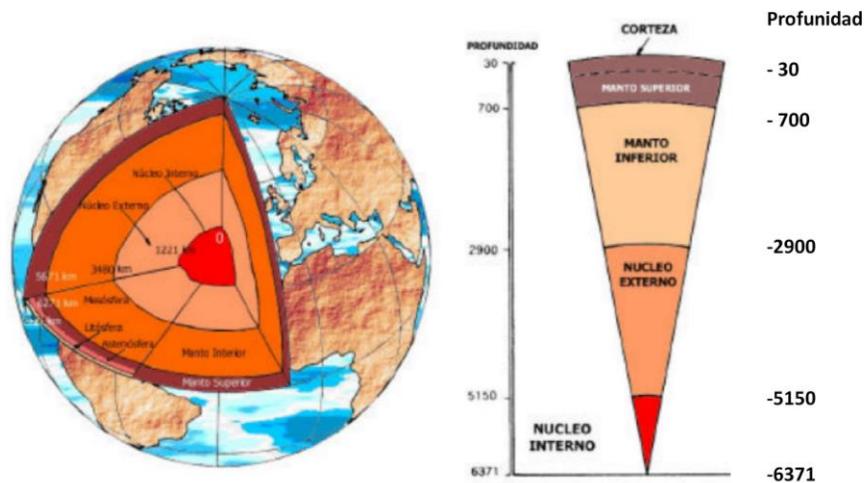


Figura 1. Estructura del interior de la Tierra (Rosenblueth, E., 1985)

La teoría de la tectónica de placas dicta que la corteza terrestre está conformada por placas rígidas que se mueven como un solo elemento, dichas placas se mueven unas con respecto a otras. La energía liberada por la interacción de éstas se propaga en forma de ondas, dando origen a los sismos. El punto donde se libera esta energía es conocido como foco o hipocentro. La proyección del foco en la superficie de la tierra recibe el nombre de epicentro.

#### 1.1.1. Tectónica

Los movimientos relativos entre placas son resistidos por la fricción, alcanzando varios centímetros por año. Estos suelen dar origen a los sismos y pueden ser de tres tipos, (Rosenblueth, E., 1985).

- 1) Separación horizontal en las aberturas: Causan temblores débiles
- 2) Deslizamiento horizontal relativo: Tienen lugar en fallas de transformación
- 3) Subducción: Se presenta porque una placa se dobla y penetra debajo de la otra

La zona de estudio de este trabajo de tesis abarca los estados de la región del Istmo de Tehuantepec que comprende los estados de Oaxaca, Chiapas, Tabasco y Veracruz además de Puebla y la Ciudad

de México, estados donde se presentaron afectaciones. Para esta zona interesan los movimientos de deslizamiento y de subducción, ya que han sido los sismos que históricamente más han afectado la zona.

Desde Colima hasta Oaxaca domina la subducción de las placas Rivera y de Cocos bajo la de Norteamérica, mientras que, al sur de Oaxaca, la placa de Cocos se subduce bajo la del Caribe, afectando con ello el estado de Chiapas.

Existen otras causas que provocan actividad sísmica, un ejemplo es la actividad volcánica; sin embargo, estos eventos son de baja magnitud y generalmente caen en el rango de microsismos, temblores que solo pueden ser detectados por sismógrafos y no tiene mayor afectación en las obras civiles.

### 1.1.2. Ondas sísmicas

Las ondas sísmicas se propagan a través de las rocas en todas direcciones desde el foco. Se les puede clasificar en dos grupos; las ondas de cuerpo o internas y las ondas superficiales. Las primeras se propagan por el interior de la Tierra, mientras que las segundas viajan sobre la parte externa de la Tierra. A continuación, (Figura 2) se muestra la clasificación de las ondas sísmicas.

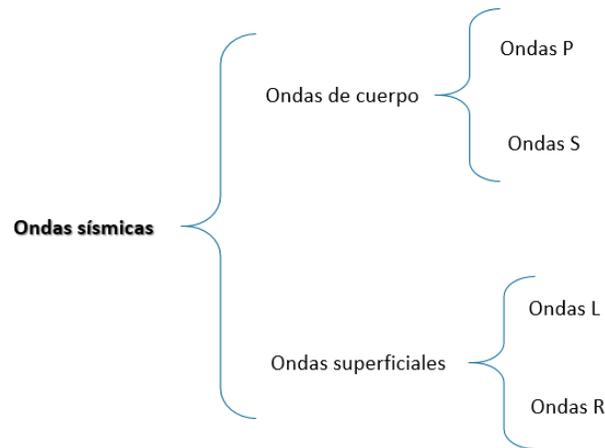


Figura 2. Clasificación de las ondas sísmicas.

#### 1.1.2.1. Ondas de cuerpo

Según (Rosales, 2001) se distinguen los siguientes tipos de ondas sísmicas de cuerpo:

- ❖ Primarias (ondas P): las cuales se propagan a mayor velocidad, por lo que son las primeras en ser registradas, producen variación de volumen. Son conocidas también como ondas longitudinales.
- ❖ Secundarias (ondas S): Se les da el nombre de ondas transversales, producen distorsión, sin cambios de volumen.

### 1.1.2.2. Ondas superficiales

La Tierra constituye un medio finito, limitado por su superficie. Cuando las ondas generadas en el foco alcanzan la superficie son influidas por esta discontinuidad y aparecen ondas de superficie. Se distinguen los siguientes tipos de ondas sísmicas superficiales (Rosales, 2001):

- Love (ondas L): Estas se propagan haciendo vibrar las partículas horizontalmente en sentido perpendicular al de propagación.
- Rayleigh (ondas R): Las ondas Rayleigh hacen vibrar a las partículas sobre un plano que apunta en dirección de la trayectoria de las ondas, con movimientos elíptico y vertical simultáneamente.

### 1.1.3. Magnitud

Es un número que busca caracterizar el tamaño del sismo y está relacionada directamente con la cantidad de energía liberada. Se mide en una escala logarítmica, por lo que cada unidad corresponde al incremento de raíz cuadrada de 1000 o de aproximadamente 32 veces la energía liberada. Para calcular la magnitud de un sismo es importante mencionar que se basa en registros obtenidos por sismógrafos de diferentes estaciones en los cuales mediante algoritmos computacionales se obtiene la estimación del valor.

### 1.1.4. Intensidad

Algunas escalas empleadas son subjetivas, es decir, que dependen de la sensibilidad y apreciación de los efectos. Y está en función de los efectos causados en el hombre, las obras civiles y, en general, en el terreno natural. Que va de lo cualitativo a lo cuantitativo, la escala de intensidades, de este tipo, más usada es la Mercalli Modificada (MM) que se muestra en la *Tabla 1* en donde el último valor puede definirse como destrucción total y no puede excederse.

*Tabla 1. Escala de Mercalli Modificada que asocia los efectos del sismo relacionadas a un valor numérico.*

Intensidad	Descripción
I	Sacudida sentida por muy pocas personas en condiciones especiales.
II	Sacudida sentida sólo por pocas personas en reposo. Los objetos suspendidos pueden oscilar.

Intensidad	Descripción
III	Sacudida sentida especialmente en los pisos altos de los edificios, muchas personas no lo asocian con un temblor. Vibración como la originada por el paso de un carro pesado.
IV	Sacudida sentida durante el día por muchas más personas. Vibración de vajillas, vidrios de ventanas y puertas; los muros crujen.
V	Sacudida sentida casi por todo el mundo. Algunas piezas de vajillas, vidrios de ventanas, etc., se rompen; pocos casos de agrietamiento de aplanados; caen objetos inestables.
VI	Sacudida sentida por todo mundo. Algunos muebles pesados cambian de sitio; daños ligeros.
VII	Daños ligeros en estructuras ordinarias bien construidas; daños considerables en las débiles o mal planeadas.
VIII	Daños ligeros en estructuras de diseño especialmente bueno; considerable en edificios ordinarios con derrumbe parcial; grande en estructuras débilmente construidas. Los muebles pesados se vuelcan.
IX	Daño considerable en las estructuras de diseño bueno; las armaduras de las estructuras bien planeadas se desploman; grandes daños en los edificios sólidos, con derrumbe parcial. El terreno se agrieta notablemente.
X	La mayor parte de las estructuras de mampostería y armaduras se destruyen con todo y cimientos; agrietamiento considerable del terreno.
XI	Casi ninguna estructura de mampostería queda en pie. Puentes destruidos. Grandes grietas en el terreno. Hundimientos y derrumbes en terreno suave.
XII	Destrucción total. Ondas visibles sobre el terreno. Perturbaciones de las cotas de nivel.

Sin embargo, este parámetro de medición debido a la subjetividad de la respuesta humana ante el movimiento y el daño a los edificios no permite realizar cálculos posteriores. Por ello es importante cuantificar un parámetro tan significativo como la intensidad sísmica.

La intensidad sísmica es una medida local de la severidad del movimiento del suelo; está relacionada con la magnitud del temblor, pero depende de otros factores como la distancia desde el epicentro, el tipo de suelo o la ruptura de las placas tectónicas. Así, la medida de intensidad que se reporta es la aceleración, que generalmente es expresada en gales<sup>1</sup> (II-UNAM; 2017). Mediante esta medida se

<sup>1</sup> abreviatura de galileo;  $1 \text{ gal} = 1 \text{ cm/s}^2$

da lugar a la creación de mapas cuantitativos de la intensidad sísmica que se verán en el siguiente capítulo.

#### 1.1.5. Instrumentación Sísmica

Para registrar el movimiento del terreno y cuantificar la energía liberada bajo la acción de las ondas sísmicas, se emplean sismógrafos y acelerógrafos. Los cuales nos proporcionan registros sísmicos, que muestran la historia en el tiempo de desplazamientos, aceleraciones o velocidades del suelo.

El sismógrafo es un instrumento de gran sensibilidad ya que es capaz de registrar la velocidad de movimiento del terreno en el sitio de registro, ya sea a causa de un sismo cercano o de uno a mayor distancia. Por otro lado, un acelerógrafo registra las aceleraciones del terreno, en dos direcciones tanto horizontal como vertical.

#### 1.1.6. Algunos fenómenos derivados de la ocurrencia de un sismo

La ocurrencia un evento como lo es un sismo importante puede generar diversas amenazas además del movimiento fuerte del terreno, tales como; réplicas, tsunamis, licuación y deslizamientos de terreno, a continuación, se presenta una breve descripción de éstas.

##### 1.1.6.1. Réplicas

Las réplicas son movimientos sísmicos de menor magnitud, que ocurren dentro de la misma área de ruptura del sismo anterior y siguen ocurriendo a lo largo de una ventana de tiempo que es difícil de determinar, ya que puede continuar por días, meses o años. Es posible considerar a las réplicas como un proceso de relajación o como eventos dependientes del sismo principal (Goltz, 1998).

El proceso de generación y distribución de las réplicas sísmicas no son bien conocidos y se han considerado múltiples explicaciones que justifiquen su ocurrencia; como lo es la suposición que existen grandes rupturas en la vecindad del evento principal que propicia rupturas más pequeñas (Felzer y Brodsky, 2006) o que las réplicas son efecto de deformaciones secundarias en fallas preexistentes (Kingh, 1985).

##### 1.1.6.2. Tsunami

El termino tsunami es japonés y su significado está dado por (tsu) "puerto" y (nami) "ola". Es un fenómeno natural que consiste en el desplazamiento vertical de una columna de agua, generando una serie de olas de manera repentina. Puede ser a causa de actividad sísmica, explosión volcánica, fenómenos meteorológicos entre otros. Sin embargo, para que un sismo pueda generar un tsunami es necesario que:

- a) El sismo sea de tipo superficial con hipocentro o gran parte de su área de ruptura se encuentre bajo el lecho marino

- b) La falla tenga movimiento vertical
- c) El sismo libere la energía suficiente

Los tipos de tsunamis de origen sísmico se clasifican de acuerdo con el tiempo de arribo a la costa desde el lugar de origen, dicho lo anterior la clasificación de un tsunami puede ser local, regional o transoceánicos.

- Local: El sitio de arribo se encuentra muy cercano, a menos de una hora, aproximadamente.
- Regional: El litoral invadido está a no más de 1,000 km.
- Transoceánica: El lugar de arribo está muy lejano, a más de 1,000 km.

#### 1.1.6.3. Licuación

Las vibraciones producidas por la actividad sísmica pueden generar un fenómeno conocido como licuación de suelos, el cual consiste en la pérdida de rigidez y resistencia al corte de este, transformándolo temporalmente en un estado licuado, el cual puede durar un periodo de tiempo muy corto, suficiente para causar pérdidas económicas y humanas, debido a que las estructuras desplantadas en suelos con este problema pierden sustento, provocando hundimientos en la mismas.

#### 1.1.6.4. Deslizamientos

Una gran proporción de los daños por sismos son debidos principalmente a fallas del terreno, tales como licuación generando fallas e inestabilidad de taludes, desplazando grandes masas de tierra decenas de metros por pendientes prolongadas. Las cuales, cuando ocurren cerca de una población, generan daños catastróficos en los bienes y pérdida de vidas.

### 1.2. Sismicidad en México

México se caracteriza por su alta actividad sísmica debido a su ubicación, ya que se encuentra localizado sobre las placas tectónicas del Pacífico, Norteamericana, Cocos, Caribe y Rivera (Figura 3) las cuales interactúan entre sí provocando movimientos telúricos.



las fallas son sucesos de deslizamiento lateral derecho, y los eventos de fallas normales ocurren en los centros de expansión (Goff, 1987).

La península y el golfo se encuentran bajo la influencia constante de actividad sísmica que afecta considerablemente la concentración humana e industrial afectando así a los estados de Baja California, Baja California Sur, Sinaloa y Sonora.

### 1.2.2. Sismicidad en México al sur

La sismicidad se distribuye a lo largo de la costa del pacífico sur mexicano, desde Jalisco hasta Chiapas, afectando también la frontera con Guatemala. La actividad sísmica está relacionada con la interacción de las placas del Pacífico, norteamericana, de Cocos y del Caribe.

Los movimientos que afectan los estados de Colima hasta Oaxaca son dominados principalmente por la subducción de las placas Rivera y de Cocos bajo la de Norteamérica. Mientras que el estado de Chiapas se ve afectado por el movimiento horizontal de la placa del Caribe con respecto a la placa Norteamericana.

Para efectuar la localización de los temblores que ocurren en el Centro y Sur de México se trabaja con la suposición que la placa de Cocos estaría dividida en tres segmentos que marcaría las diferencias en la distribución de la actividad sísmica en la región (Beyis, M e Isacks, 1984). Sin embargo, utilizando un análisis de superficie de tendencia hipocentral no se encontró evidencia, por lo que se sugirió que la transición tiene lugar en un pliegue.

La distribución de la actividad sísmica se puede diferenciar, *grosso modo*, cuatro zonas (Palomino, 1986):

- 1) La zona Istmo de Tehuantepec-Chiapas, en la que observamos la actividad superficial concentrada entre el eje de la trinchera y la línea costera, además de una fuerte concentración de la actividad en el Istmo de Tehuantepec
- 2) La zona de Oaxaca, que presenta la particularidad de que una parte de la actividad superficial ocurre en la zona oceánica, fuera del eje de la trinchera y los eventos de profundidad mayor de la normal se sitúan en la parte norte de Oaxaca-sur de Veracruz
- 3) Zona de Guerrero- Michoacán, en la que observamos que la actividad superficial queda prácticamente limitada por el eje de la Trinchera, en el lado oceánico y los movimientos de profundidad mayor de 60 km están localizados en una zona paralela a la trinchera en el interior de continente.
- 4) Zona Colima-Jalisco, la cual se caracteriza por un descenso considerable en la frecuencia de ocurrencia en la actividad sísmica y parece estar limitada al sur-este por una concentración de la actividad de profundidad intermedia en la región Michoacán-Jalisco.

Esta clasificación está sustentada en base a la actividad sísmica durante el período de 1969 a 1973, con información del Servicio Sismológico Nacional (SSN) y complementada con datos del

International Seismological Center (ISC) y de las tarjetas Preliminary Determination of Epicenters (PDE) del U. S. Coast and Geodetic Survey en donde la clasificación nos muestra las profundidades aproximadas de los eventos ocurridos en dicha zona.

La zona Colima- Jalisco es afectada por la interacción entre la placa de Rivera y la de Norteamérica. Mientras que la zona Michoacán-Guerrero, presenta características que la identifican como zona de subducción normal. Y, siguiendo hacia el oriente, la zona que se encuentra comprendida entre los límites Guerrero-Oaxaca y el Istmo de Tehuantepec presenta una faja de actividad sísmica superficial en la parte exterior a la trinchera.

### 1.3. Daños en las estructuras

La Real Academia Española (RAE) define daño, como el valor de la pérdida sufrida o de los bienes destruidos o perjudicados. En el área de la ingeniería, el termino daño estructural, no tiene una definición clara, puesto que esté depende del juicio o experiencia de la persona responsable de evaluarlo, sin embargo, para fines de este trabajo escrito será definido como la degradación o destrucción causado por un fenómeno peligro sobre las personas, bienes, etc.

Los sismos de magnitudes grandes pueden causar afectaciones severas las cuales pueden traducirse en pérdidas económicas y sociales. Desde el punto de vista de la ingeniería estructural, las pérdidas en edificaciones están asociadas principalmente a daños en los elementos estructurales y no estructurales.

#### Elementos propensos a daño

Para hacer una estimación de los daños expuestos dentro de una estructura es importante clasificarlos en dos grupos; elementos estructurales y no estructurales, (Figura 5).

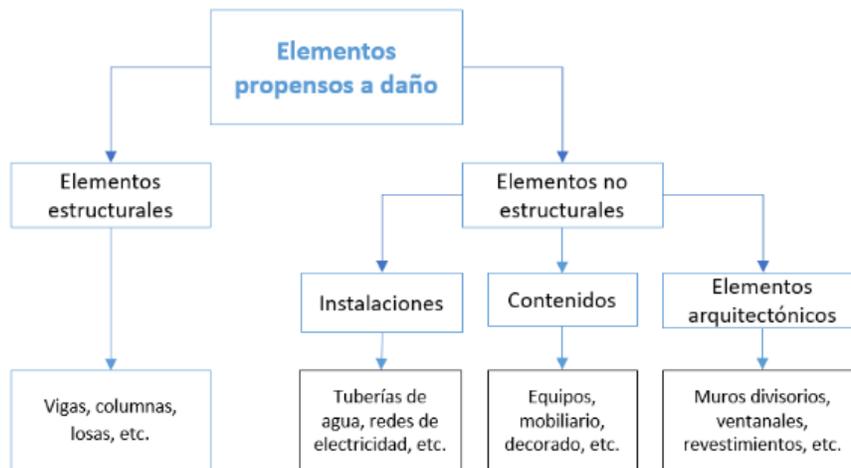


Figura 5. Clasificación de elementos propensos al daño

Los elementos estructurales hacen referencia a los sistemas que soportan cargas verticales (gravitatorias) y cargas laterales (sismo, viento, etc.), y que además proporcionarán la resistencia, rigidez y estabilidad de la estructura, trabajando como un sistema que se relaciona entre sí.

En cambio, los elementos no estructurales abarcan las (1) instalaciones, (2) contenidos y (3) elementos arquitectónicos, los cuales no están pensados para transmitir cargas, sino más bien para temas de serviciabilidad dentro del inmueble. El primer grupo hace referencia al conjunto de partes que tienen como fin el suministro de servicios, el segundo a los objetos que se encuentran dentro del inmueble y el último puede definirse como los componentes utilizados para el aprovechamiento de espacios y aspectos estéticos.

### 1.3.1. Análisis de daño

El término daño es ampliamente utilizado, y pretende representar el deterioro físico de los diferentes elementos o el impacto económico asociado (Yépez, 1996). Generalmente el daño estructural se relaciona con deformaciones irreversibles o deformaciones inelásticas, las cuales pueden ser medidas a partir del desempeño de la estructura ante la demanda sísmica (Buendía, 2016).

La valoración del daño se realiza después de que ocurre un evento perturbador, como lo es un sismo, por tal motivo, es necesario cuantificar y analizar los efectos desencadenados por este acontecimiento; sin embargo, muchas veces no se cuenta con un grado de certidumbre debido a los siguientes factores:

- La diferencia entre documentos oficiales y lo que realmente se construyó
- Falta de planos y memorias técnicas donde se especifiquen las secciones
- Los armados, materiales y consideraciones de diseño y análisis estructural
- Deterioro acumulado

Representar el daño cualitativa o cuantitativamente en relación con el costo de reparación aún no está bien fundamentada, por lo que la principal incertidumbre es la asignación correcta del costo de reparación. Este tipo de representación resulta muy útil en la evaluación del riesgo sísmico asociada a pérdidas económicas y sociales, ya que podría permitir una visión más clara que serviría para una buena toma de decisiones.

#### 1.3.1.1. Clasificación del daño en las edificaciones

Un estado de daño es una descripción del detrimento que ha sufrido una estructura, la cual generalmente se puede representar de manera cualitativa y/o cuantitativa (Buendía, 2016).

### 1.3.1.2. Estados discretos de daño

Puede definirse como una descripción cualitativa de los efectos producidos por un sismo y se encuentran en función de la condición límite de los siguientes aspectos: daños físicos en los elementos estructurales, peligro latente al que los ocupantes se encuentran expuestos y finalmente a la funcionalidad posterior del inmueble a otro evento. Sin embargo, esta clasificación tiene el problema que es de carácter subjetivo. A continuación, se presentan algunas clasificaciones.

#### **Clasificación de acuerdo con los daños observados**

Propuesto a partir de los daños observados después de la ocurrencia de un sismo, lo cual nos lleva a considerar los siguientes estados de daño que se presentan en la Tabla 2 (Park, R. y Ang, 1987). Los cuales comprenden daños estructurales y no estructurales.

*Tabla 2. Relación del estado de daño con las características que debe presentar la edificación (Park, R. y Ang, 1987).*

<b>Estados de daño</b>	<b>Características</b>
Sin daño	En el peor de los casos se producen pequeñas fisuras en el hormigón.
Ligero	Se producen grietas en varios elementos estructurales.
Moderado	Agrietamiento severo y se produce algunos desprendimientos de hormigón
Severo	Aplastamiento del hormigón y pérdida del recubrimiento de las barras de acero de refuerzo
Colapso	

(Petrovski, 1989) sugiere una clasificación de acuerdo con los daños observados y la disponibilidad de la estructura para ser utilizada después de un sismo. Definida en tres categorías, la cual abarca daños estructurales véase Tabla 3.

*Tabla 3. Características aplicables a estructuras de concreto reforzado y mampostería estructural (Petrovski, 1989).*

<b>Estados de daño</b>	<b>Características</b>
Utilizable	Los daños estructurales son leves, lo cual permite que la estructura puede ser utilizada inmediatamente después de ocurrido el sismo.
Temporalmente utilizable	Los daños estructurales varían entre moderados y severos, por lo tanto, la estructura puede estar temporalmente inutilizable.
Moderado	Los daños estructurales son severos. Se puede producir el colapso parcial o total del edificio. La estructura no puede ser utilizada después del sismo.

Existen diversas clasificaciones respecto a los estados de daño discretos, en algunas se involucrarán daños a los elementos estructurales y no estructurales (como se presentó en las tablas anteriores), y en otras se estudia la funcionalidad y los costos de reparación, entre otros.

### 1.3.1.3. Estados continuos de daño

Representado por un índice de daño el cual puede representarse a través de un valor numérico (Buendía, 2016). Para representar el daño sufrido por un miembro o toda la estructura, generalmente se involucra variables como: deformación unitaria, curvatura, rotaciones, desplazamientos, distorsión de entrepiso, fuerzas, energía absorbida y energía disipada (Bonnet, 2003).

#### - Relaciones demanda – capacidad de deformación

En donde se relaciona la distorsión de entrepiso y la ductilidad, que se define como la capacidad de la estructura a deformarse inelásticamente sin llegar a la falla y perder su resistencia. La relación de ductilidad ( $\mu$ ), está definida en términos de rotación ( $\theta$ ), curvatura ( $\Phi$ ) y desplazamiento ( $\delta$ ), a través de las siguientes relaciones:

$$\mu_{\theta} = \frac{\theta_m}{\theta_y} \dots (1.1)$$

$$\mu_{\Phi} = \frac{\Phi_m}{\Phi_y} \dots (1.2)$$

$$\mu_{\delta} = \frac{d_m}{d_y} \dots (1.3)$$

Los subíndices  $m$  e  $y$  corresponden respectivamente al valor máximo alcanzado por la sección del elemento debido a la demanda y al instante de fluencia del elemento. La ecuación (1.3) corresponde al modelo propuesto (Newmark, N y Rosenblueth, 1971).

El inconveniente de este tipo de modelos es que las relaciones de ductilidad no toman en cuenta los efectos de los ciclos repetitivos ocasionados por las cargas sísmicas; sin embargo, debido a sus simplicidad y fácil interpretación, continúan siendo utilizadas como parámetros críticos de diseño y evaluación estructural (Park, 1986; Penzien, 1993).

#### - Relaciones demanda – capacidad de resistencia

Utiliza un índice que relaciona la demanda con la capacidad de resistencia, a través de los diagramas de Momento- Curvatura (Hasselman, 1980) mostrado en la Figura 6, obtenidos a partir del modelo definido por la ecuación (1.4) y la ecuación (1.5).

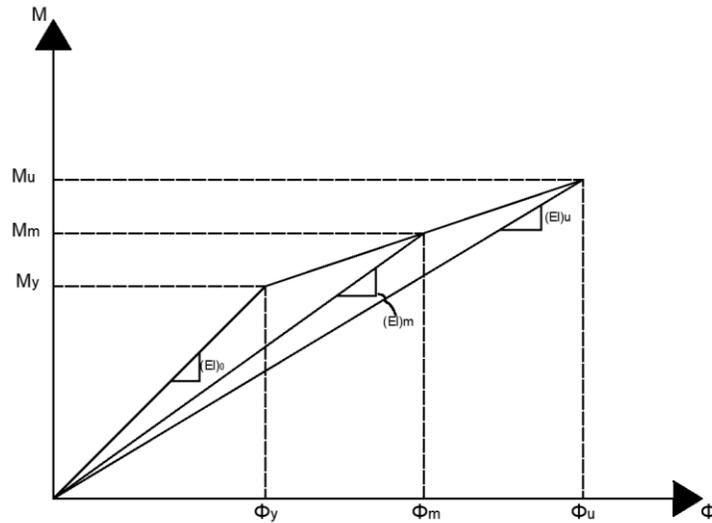


Figura 6. Parámetro del modelo de daño (Bracci, 1989).

El modelo se define como;

$$I_D = \frac{M_m - M_Y}{M_u - M_Y} \dots (1.4)$$

$$I_D = \frac{V_m - V_Y}{V_u - V_Y} \dots (1.5)$$

Donde los subíndices  $y$ ,  $u$  y  $m$  corresponden respectivamente a los niveles de cedencia, capacidad última y capacidad máxima del elemento debido al sismo. Si el valor de  $I_D$  es igual a la unidad significa el colapso de la estructura y si es igual a cero representa que no hay daño.

#### 1.3.1.4. Relación entre los estados discretos y continuos de daño

Descrito anteriormente se presentaron algunos índices de daños existentes para las estructuras de concreto de reforzado, así como otras propuestas para clasificar el daño de acuerdo con estados de daño definidos cualitativamente a partir del daño observado. Dichas relaciones son empleadas principalmente para evaluar la vulnerabilidad sísmica de una estructura, en la cual se deben relacionar metodologías cuantitativas y cualitativas. Existen, por ejemplo, relaciones entre el índice de daño y estados de daño, ver Tabla 4 (Park, R. y Ang, 1987).

Tabla 4. Parámetros de entre daño total y estados discretos (Park, R. y Ang, 1987).

Intervalo de variación de $I_D$	Estado discreto de daño
$I_D < 0.1$	Sin daño
$0.1 \leq I_D < 0.25$	Ligero
$0.25 \leq I_D < 0.40$	Moderado

$0.40 \leq I_D < 1.0$	Severo
$I_D \geq 1.0$	Colapso

Otra correlación entre los daños cualitativos y cuantitativos es la establecida por (Okada y Takai., 1999). Agrupando los daños en cuatro estados principales, Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de entre daño total y estados discretos, (Okada y Takai., 1999).

Intervalo de variación de $I_D$	Estado discreto de daño
$0 < I_D < 0.05$	Sin daño (SD)
$0.05 < I_D \leq 0.40$	Daño moderado (Dm)
$0.40 < I_D \leq 0.60$	Daño severo (DS)
$0.60 < I_D \leq 1.0$	Daño mayor (DM)

El valor de un índice de daño por sí solo no representa ningún tipo de evaluación de la vulnerabilidad sísmica. Para que estos índices puedan ser interpretados, es necesario establecer una relación entre su rango de variación y los estados discretos de daño (Bonnet, 2003).

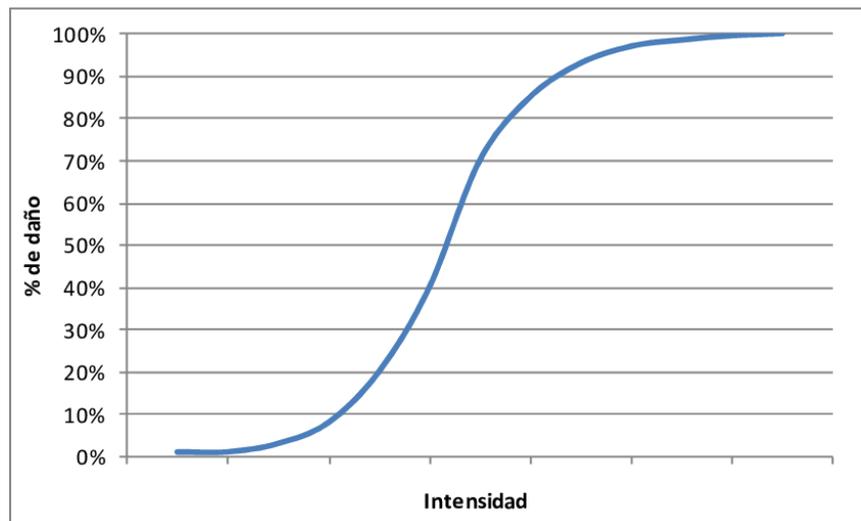
### 1.3.2. Vulnerabilidad

La vulnerabilidad sísmica de una estructura o de una zona urbana completa, se define como su predisposición intrínseca a sufrir daño ante la ocurrencia de un movimiento sísmico y está asociada directamente con sus características físicas y estructurales de diseño (Barbat, 1998). Este concepto es indispensable para estudios sobre riesgo sísmico y la mitigación de desastres por terremotos (Bonnet, 2003). Por lo que la mitigación de los desastres tiene como objetivo la mejora del comportamiento sísmico de los edificios de una zona, a fin de reducir los costes de los daños esperados durante el terremoto (Barbat, 1998).

#### 1.3.2.1. Evaluación de la vulnerabilidad de una estructura

La evaluación de la vulnerabilidad generalmente es un ejercicio pre-sísmico, es decir, conocer que podría ocurrir en términos de daño dado la ocurrencia de un sismo. Sin embargo, también es posible conocer la vulnerabilidad de una estructura recién afectada por un evento de esta naturaleza. Para ambos casos existen métodos bien definidos.

El cálculo de la vulnerabilidad está expresado mediante “funciones de vulnerabilidad” las cuales describen el daño esperado como función de la demanda sísmica, la cual puede estar expresada mediante la aceleración máxima del suelo (PGA) o la aceleración espectral ( $S_a$ ) o cualquier medida de intensidad.



*Figura 7. Ejemplo de una curva de vulnerabilidad sísmica*

Existen al menos cuatro maneras de determinar la vulnerabilidad de las estructuras ante amenazas determinadas:

**i. Métodos empíricos**

Basada principalmente en la opinión de expertos en análisis, diseño y patología estructural; la estimación de la vulnerabilidad se obtiene a través de expresiones sencillas que involucran un parámetro cuantificador que relaciona la medida de intensidad con el daño esperado. La ventaja es la simplicidad involucrada para evaluar un gran número de estructuras de forma rápida, sin embargo, también representa desventaja, ya que es necesario consultar un gran número de expertos en el tema y debido a esto se crea una gran subjetividad en los resultados.

**ii. Métodos analíticos**

Los métodos analíticos nacen a partir del estudio teórico de la mecánica de materiales y el análisis estructural de un modelo numérico para estimar el comportamiento de las estructuras ante cargas laterales. Dichos modelos analíticos van desde lo muy simples a lo muy complejo, esto depende del nivel de detalle y tiempo disponible para el modelado. Una vez definido el modelo se deberá precisar el modelo de comportamiento que mejor se adecue al sistema estructural analizado, para después estimar la respuesta estructural. Tiene la ventaja de ser la solución más adecuada para poder definir la vulnerabilidad de una estructura bajo diversos niveles de demanda, aun cuando esta no haya ocurrido. Y tiene la desventaja de que se necesita un tiempo computacional considerable, el manejo de los datos obtenidos deberá ser muy cuidadoso, además se deberá obtener una parametrización adecuada para que las características estructurales que más influyan en la respuesta se tomen en cuenta.

### iii. Métodos experimentales

Las curvas de vulnerabilidad se obtienen a través de la respuesta estructural medida en modelos de tamaño real o a escala de una estructura o edificación determinada sometida a movimientos en su base dentro de un ambiente totalmente controlado. Estos métodos implícitamente requieren de una serie de simplificaciones impuestas por el modelo y los patrones de carga utilizados en el modelo para simular la acción sísmica. Se pueden realizar dos tipos de ensayo que están basados en el tipo de carga aplicada al modelo: 1) carga monótona creciente mediante actuadores de carga o desplazamiento y 2) carga cíclica reversible mediante el uso de una mesa vibradora y registro sísmicos. Tienen la ventaja de que los datos obtenidos reflejan lo que se presenta en la realidad; no obstante, presentan algunas desventajas tales como: el costo para realización del proyecto, el rango de error que tienen los encargados de realizar la prueba es muy pequeño, existe una gran cantidad de personal involucrado, e tiempo de preparación del proyecto puede ser muy largo, se limita a solo la estructura de estudio, entre otros.

### iv. Métodos estadísticos

Se realizan mediante la observación de daños en estructuras después de la ocurrencia de un movimiento sísmico real. Para aplicar estos métodos las estructuras deberán ser clasificadas por su tipología. Tienen la ventaja de que representan fielmente los daños ocurridos a estructuras que hayan sido expuestas al fenómeno perturbador; pero, tiene la desventaja de no tener datos para todos los eventos y todas las posibles intensidades de ocurrencia, además de que los datos más relevantes se obtienen ante eventos de muy poca frecuencia. Estos métodos la mayoría de las veces son usados para la calibración de los resultados obtenidos por otros métodos.

## 2. Capítulo 2. Aspectos sismológicos de la zona del Istmo y descripción del evento de estudio

El estudio del peligro sísmico involucra principalmente el análisis de la sismicidad local, lo que implica estudiar la estructura, morfología, evolución y dinámica de la misma. Por lo que en este capítulo se abordarán algunas particularidades del evento del 7 de septiembre de 2017, así como sus fenómenos conexos.

## 2.1. Tectónica de placas en la zona de estudio

De acuerdo con la teoría de la tectónica de placas, la actividad sísmica y tectónica del país se asocia principalmente a la interacción entre las placas del Pacífico, Norteamericana, de Cocos y del Caribe (Molnar, P., 1969). Sin embargo, esto no siempre se supo, sino que fue a partir del estudio de la distribución de la cadena volcánica centroamericana (Stoiber, R. E., 1973) en donde se propuso la existencia de una placa segmentada que subduce con un ángulo de buzamiento diferente para cada segmento, provocando variaciones en el alineamiento de los volcanes paralelamente a la costa. Lo anterior da lugar a la gran actividad volcánica y sísmica entre los límites de la placa que buza.

Con la finalidad de tener una idea más detallada para el estudio de la tectónica de la región del Istmo de Tehuantepec y la costa del Pacífico, se determinó el mayor número posible de soluciones focales.

Mediante cortes esquemáticos perpendiculares a la trinchera se muestra la variación de la solución de mecanismo focal a lo largo del plano de subducción en diferentes partes de la fosa para localización de los perfiles de la zona Guerrero, zona Oaxaca central, Oaxaca-Istmo de Tehuantepec, Istmo de Tehuantepec-Chiapas, Chiapas central, Chiapas-Guatemala y Guatemala. Los resultados del análisis muestran que en general, la distribución de los mecanismos indica la existencia de una zona de subducción normal, (Isacks, 1971).

A lo largo de los años se ha estudiado el comportamiento sismo-tectónico con base en información que nos proporcionan los eventos sísmicos los cuales proporcionan cierta información como la profundidad, magnitud, epicentro entre otros. Lo descrito anteriormente ayudará a comprender las diferencias y similitudes que comparte la zona de estudio.

La sismicidad y la tectónica del sur de México se caracterizan por la subducción de las placas oceánicas de Cocos y Rivera debajo de la litosfera de América del Norte a lo largo de la trinchera Centroamericana. Varios estudios han demostrado que esta zona de subducción exhibe variaciones laterales en la inmersión de la litosfera oceánica subducida (Stoiber, R. E., 1973).

Una de las características tectónicas más significativas en el sur de México es la ubicación del Cinturón Volcánico Transmexicano, el cual cruza dicha zona de Este a Oeste. La distribución del arco volcánico es oblicua a unos  $16^\circ$  aproximadamente con respecto a la Trinchera Centroamericana y su geometría no es paralela a la zona de subducción. Varias hipótesis se han planteado acerca del no paralelismo del Cinturón Volcánico Transmexicano en relación con la Trinchera Centroamericana y

su relación con la placa oceánica subducida. Dichas hipótesis se pueden dividir en dos grupos: aquellas que favorecen la relación directa entre subducción y vulcanismo (Molnar, P., 1969) y las que sugieren que el Cinturón Volcánico Transmexicano no tiene relación tectónica directa con la subducción a lo largo de la Trinchera Centroamericana, y se explica como resultado de zonas de debilidad dentro de la corteza del sur de México de episodios de deformaciones anteriores (Moose, 1972).

A continuación, se describen con más detalle las placas tectónicas involucradas en la sismicidad de la zona:

### Placa Rivera

La existencia de la pequeña placa de Rivera surgió por primera vez por (Atwater, 1970). Desde entonces, varios autores han demostrado que la placa de Rivera es cinemáticamente distinta de la placa de América del Norte y Cocos (Bandy, W y Yan, 1989). La unión entre el ascenso del Pacífico oriental y la zona de fractura de Rivera se encuentra a 165 km al oeste de la Trinchera Centroamericana (Bourgois, J. y Michaud, 1991). La ubicación precisa del límite Rivera-Cocos sigue siendo controvertida.

### Placa Norteamericana

La Placa Norteamericana es una placa tectónica continental que cubre América del Norte (incluyendo a Groenlandia), la parte occidental del Océano Atlántico, una parte del Océano Glacial Ártico y el territorio siberiano al este de la Cordillera Verkhoyansk. Limita al norte con la placa Euroasiática; al sur con las placas de Cocos, del Caribe y Sudamericana asociada principalmente con la fosa Mesoamericana; al este limita con la placa Euroasiática y la africana, formando un límite divergente manifestado como la dorsal Mesoatlántica; por último, al oeste limita con la placa Juan de Fuca, de la que la separa un límite convergente, y con la Pacífica, cuyo borde, situado a la altura de la falla de San Andrés.

### Placa de Cocos

La placa de Cocos se encuentra subducida por debajo de la placa Norteamericana. La edad de la placa de Cocos varía a lo largo de la Trinchera Centroamericana, de acuerdo con los saltos asociados a la zona de fractura. Una corteza más joven y poco profunda al noroeste difiere en edad al sureste de la cresta de Tehuantepec en aproximadamente 10 a 25 m (Couch, R., 1981).

La variación en el ángulo de subducción se basa principalmente en la sismicidad y los mecanismos focales, pero la sismicidad en el centro es escasa y se concentra entre la trinchera y la costa. La ubicación y las propiedades de la placa son importantes para comprender la evolución tectónica de este sistema de subducción. La extensión de profundidad de los diversos segmentos de la zona de

subducción se correlaciona directamente para delinear las diferencias en las estructuras de las placas tectónicas. Algunos estudios se han basado en la sismicidad y muestran el alineamiento y dirección de la placa en la trinchera, lo que muestra que la trinchera no es paralela a la faja volcánica Transmexicano, lo cual explicaría históricamente que la placa de Cocos era pareja y después de unos millones de años cambió y provocó que el vulcanismo se trasladara hacia el Sur. Esto incitó rupturas en la placa y la migración en la geoquímica de los magmas (Sahakian et al., 2018).

#### Ajuste tectónico de la zona de subducción de Tehuantepec.

El Golfo de Tehuantepec muestra diferencias drásticas en la geometría y el comportamiento sísmico. Una de las características más notables de la región es la subducción de las características batimétricas conocidas del Istmo de Tehuantepec, separando la placa de Cocos en dos zonas de diferente edad y características tectónicas (Manea, M. y Kostoglodov, 2005). En su intersección cerca de la Trinchera Centroamericana, el Istmo de Tehuantepec es altamente asimétrico, se eleva entre 400 y 1100 m por encima del fondo oceánico. Este también marca el borde donde la placa de Cocos subducida cambia la inmersión de la subducción sub horizontal debajo de México Central con un ángulo de inmersión aproximado de 45° debajo del Sureste de México y Centroamérica (Pardo, M. y Suarez, 1995).

Donde el Istmo de Tehuantepec se subduce por debajo de la placa Norteamericana, se desvía bruscamente la trinchera y la línea costera. El segmento de Tehuantepec de la Trinchera Centroamericana se identifica como una brecha sísmica donde no se conocen la ocurrencia de grandes sismos por contacto de la placa desde 1902 (Kelleher, J. y Sykes, 1973). Los sismos en la parte norte del istmo de Tehuantepec de magnitud moderada se han atribuido a la deformación de la placa superior en respuesta al esfuerzo de compresión inducido por la subducción de esta altura batimétrica (Suárez, G. y López, 2015).

Todas estas características sismo-tectónicas presentes en esta zona dan lugar a una gran actividad sísmica la cual ha sido estudiada con el objetivo de interpretar el presente y avizorar el futuro. De modo que es muy importante conocer los sismos más importantes que han ocurrido en la zona de estudio.

## 2.2. Sismos importantes ocurridos en la zona

México se encuentra en una zona de alta sismicidad, por esta razón no es rara la ocurrencia de sismos. La Figura 8, presenta un mapa de sismicidad del año 2018. De acuerdo con el Servicio Sismológico Nacional (SSN), se registran en promedio la ocurrencia de 40 sismos por día (SSN, 2018).

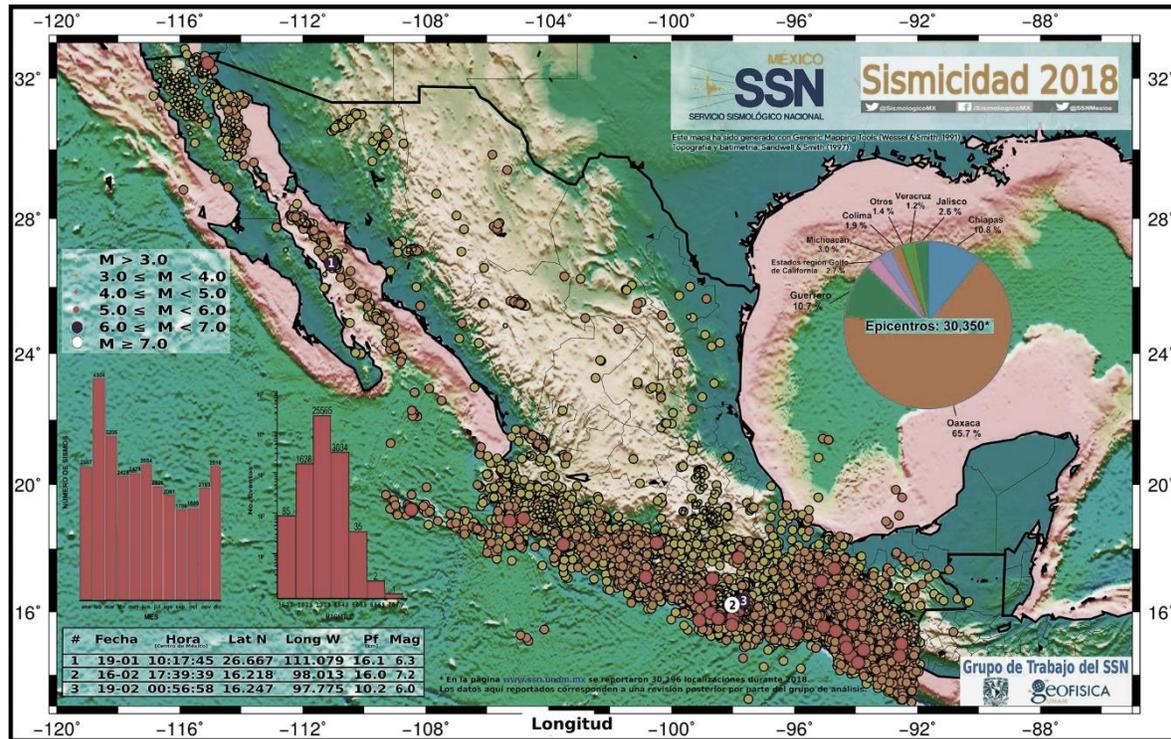


Figura 8. Mapa de sismicidad anual (SSN, 2018)

El mapa de sismicidad anual 2018 (Figura 1) nos proporciona información general de los eventos registrados en el país. El umbral de magnitudes representa todos los sismos mayores a  $M_w$  3 de acuerdo con la escala manejada en el SSN.

La evolución de la manera de registrar movimientos sísmicos incluye tres aspectos fundamentales como lo son: el fechamiento, la medición y la descripción. Es decir, indicar el momento, tiempo y lugar en que ocurre dicho evento. Esto tres parámetros han estado en función del momento histórico, de las concepciones de la sociedad, de la cosmovisión y del avance conocimiento científico. Por lo que antes de la creación de instrumentos, los registros de estos eventos eran poco precisos por las limitaciones tecnológicas de la época.

A continuación, se presentan sismos registrados antes de la creación del Servicio Sismológico Nacional, que fueron recuperados a través de (García, V. y Suarez, 1996).

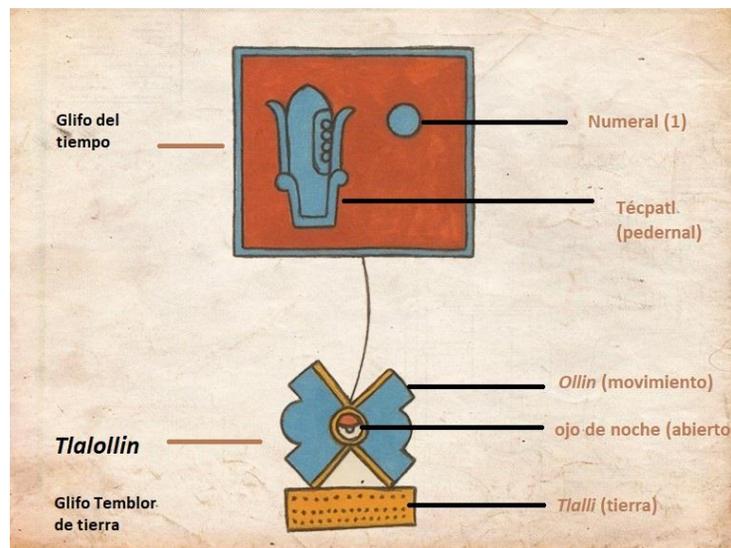
i. Sismos registrados antes del SSN

Los eventos sísmicos que datan entre el siglo XV e inicios del XVI se registraron en códices y anales a través de glifos. La representación del movimiento sísmico se forma en conjunción del glifo *ollin* que significa movimiento y el glifo *tlalli* o tierra. El primero se representa con un círculo alrededor del cual aparecen cuatro aspas, como se muestra en la *Figura 9*, que dan la idea de movimiento (Florescano, 1987). Por su parte, el glifo *tlalli* es representado por una o varias franjas de terreno, sobre las cuales aparecen puntos que se asemejan a las semillas o granos. De esta manera *tlalli* asociado a *ollin*, significan movimiento de tierra o sismo (Ayala, 1987).

La información proporcionada por las representaciones pictográficas no menciona hora, duración y mucho menos la dirección del movimiento. Señalando solo el año del evento y en contados casos, se registra el daño humano y material desencadenado por dicho evento. Respecto a la intensidad, se cuantificaba de acuerdo con el poder destructivo (R. Jiménez, 1987). Su fechamiento es respecto al año en la cuenta indígena, cuyo equivalente con el calendario cristiano ha sido ya establecido por varios estudios antropológicos.

En ocasiones el pictograma *tlalollin*, brinda más información, es decir, muestra dentro del círculo central una especie de ojo que corresponde al “ojo de la noche”, o bien está coloreado en rojo lo que representa al sol. Dando así una idea de si el evento ocurrió durante el día o la noche.

En la *Figura 9* se muestra la representación pictográfica de un registro sísmico, está compuesto por el glifo de tiempo con el numeral (1) y el *Técpatl* (pedernal) unido por un lazo al glifo temblor de tierra *tlalollin* en donde al centro de este se encuentra el “ojo de la noche” (abierto). La lectura corresponde a que en el año uno pedernal hubo un temblor de tierra durante la noche.



*Figura 9. El pictograma “tlalollin” representa el sismo, mientras que el ojo corresponde al “ojo de la noche” y los dibujos corresponden a los cuadrantes cronológicos.*

Para los eventos sísmico que van desde principios del siglo XVI e inicios del siglo XIX tiene una característica relacionada con los cambios en el periodo colonial. La teología y ciencia se hallan íntimamente sobrepuestas y las ideas acerca de Dios, de sus atributos y perfecciones marcaban profundamente la concepción científica del mundo natural (Capel, 1985) Es decir, todo lo que existía constituía una manifestación divina.

Las fechas de los sismos de este periodo son más confiables debido a la unificación en el calendario. Algunos sismos ocurridos durante la colonia como durante el siglo XIX, pasaron a la historia con el nombre del santoral correspondiente. Como en el caso del sismo ocurrido el 19 de marzo de 1682 que afectó principalmente el estado de Oaxaca, de acuerdo con el diarista Antonio de Robles “tembló horriblemente, duró como seis credos” (García, 1996). Sin embargo, la manera en la que se podía determinar la duración no era tan exacta.

Por otro lado, la intensidad constituía a una medida de los efectos causados por el sismo, con esos fines se utiliza la escala de intensidades Mercalli Modificada, la cual se definió en el capítulo anterior. Posteriormente, como parte de la influencia de las ideas ilustradas y en aras de evitar estas subjetividades, algunos científicos del siglo XVIII se valieron de objetos a modo de instrumentos de medición emprendiendo el camino a la construcción de aparatos destinados a registrar diversas características de los sismos.

Con base en lo anterior se pudo recabar información sobre sismos que han afectado la zona de estudio antes de la creación del Servicio Sismológico Nacional la que se resume en la siguiente *Tabla 6*.

*Tabla 6. Sismos recopilados a través de la plataforma digital “Sismos Históricos” la cual se base en datos recopilados por (García, V. y Suarez, 1996), y finalmente culminó con la publicación del libro “Los Sismos en la Historia de México”.*

Fecha	Magnitud Estimada	Lugar de origen	Observaciones
01/04/1523		Puebla	
25/12/1545		Chiapas	Miedo en la población, daños insignificantes.
19/02/1575		Puebla	Se llenaron de cuarteaduras los templos de Nopalucan y de Acatzingo, Puebla.
14/03/1591		Chiapas	Destruyó y arruinó los edificios principales, derribando la torre de la iglesia.
19/03/1682	M > 7	Oaxaca	En Oaxaca se reporta que los edificios y casas resintieron a los efectos del sismo. Algunos colegios y las bóvedas iglesias quedaron en ruinas y tuvieron que ser demolidos.
10/03/1727		Oaxaca	
04/04/1768	M > 7	Puebla	En la ciudad de México el Convento de Churubusco se vio afectado en su cañería y atarjea. En Atlixco, Puebla, se cayó la torre de un templo causando la muerte a 30 personas y en Jamiltepec, Oaxaca. el sismo derribó muchas casas.
28/03/1787	9	Oaxaca	En la Ciudad de México el sismo causó estragos en los arcos de los acueductos. En Oaxaca, Oaxaca. causó estragos en las casas. En Tehuantepec, arruinó la iglesia de S. Sebastián y rompió los muros del templo de Sto. Domingo. En San Miguel Tomatlán y Zongolica, Veracruz. causo daños a las iglesias parroquiales. De las referencias es difícil discernir cuales fueron los daños causados por cuál de los cuatro grandes sismos que en esas fechas se presentaron.

04/09/1787		Veracruz	Algunos prejuicios en la ciudad de México, Veracruz y Puebla. Solo sentido en Oaxaca.
23/05/1795	9	Oaxaca	En particular, se reporta que los conventos de Sto. Domingo y del Carmen Alto sufrieron notables quebrantos en Oaxaca. El templo de la Consolación cayó al suelo en su mayor parte. Algunos daños en la ciudad de Oaxaca, hubo 80 heridos y contusos, de los cuales murieron siete. En pueblos de Oaxaca se obstruyeron caminos por cerros derrumbados.
05/10/1801	6.8	Oaxaca	
11/02/1803		Oaxaca	Varias iglesias fueron dañadas en la sierra de Oaxaca
13/07/1827		Puebla	En Tehuacán, Puebla. la sacristía del hospital de San Juan de Dios se hundió.
05/05/1854	7.2	Oaxaca	Sufrió notable deterioro el acueducto que conducía las aguas a la ciudad de México por el rumbo de S. Cosme. En Córdoba, Veracruz, dejó muy maltratadas la parroquia y la mayor parte de las casas. En Jamiltepec, Oaxaca, causó varios derrumbes y hundimientos en los cerros y montes vecinos. en Jamiltepec.
01/02/1855	6.6	CDMX	En la ciudad de México averió varios puentes y cuarteó los acueductos de San Cosme y de Belén. En Ometepec, Oaxaca. se describe como causando grandes estragos sin dar detalles.
11/05/1870	8	Oaxaca	En la ciudad de Oaxaca se dañaron el Palacio de Gobierno y el Palacio de Justicia. Varios barrios de la ciudad sufrieron serios daños donde las casas se vinieron al suelo o quedaron severamente dañadas. En Orizaba, Veracruz. muchos edificios sufrieron daños.
27/02/1872	7.5	Oaxaca	Los mayores daños se observaron en Pochutla, Oaxaca. donde se reporta que muchas iglesias perdieron sus torres y bóvedas.
05/06/1897	6.5	Oaxaca	Se reporta que las ciudades de Tehuantepec y Juchitán, Oaxaca. están en ruinas. En la primera cayeron casi todas las casas y que la Catedral y el Palacio Episcopal han sufrido grandes averías. Las iglesias de Cerrito, Lieza y Mixtequilla, Oaxaca. están completamente derrumbadas.

## ii. Sismos registrados por el SSN

Con la creación del Servicio Sismológico Nacional, es posible la consulta en línea de los sismos más importantes registrados en la zona de estudio, esta información recabada por el propio SSN, cuenta con registros que van desde 1900, esto debido a las limitaciones tecnológicas de esa época, los sismos registrados en la *Tabla 7* son a partir de magnitudes de  $M_w$  6.5.

*Tabla 7. Tabla de Sismicidad Histórica de la zona de estudio, de acuerdo con magnitudes importantes. Información proporcionada por SSN.*

Fecha	Magnitud	Profundidad [km]	Latitud, ° N	Longitud, ° O	Localización
23/09/1902	7.7	25	16.5	92.5	5 km al Suroeste de Teopica, Chiapas.
18/04/1902	7.5	25	14.9	91.5	72 km al Este de Cacahoatan, Chiapas.
13/01/1903	7.6	33	15	93	50 km al Sur Mapastepec, Chiapas.
09/02/1928	6.5	84	18.26	97.99	9 km al Noreste de Acatlán de Osorio, Puebla.
21/03/1928	7.5	33	15.67	96.1	12 km al Sureste de Crucecita, Oaxaca.

Fecha	Magnitud	Profundidad [km]	Latitud, ° N	Longitud, ° O	Localización
08/10/1928	7.5	33	16.3	97.3	35 km al Noreste de Rio Grande, Oaxaca.
14/01/1931	7.8	40	16.34	96.878	30 km al Oeste de Miahuatlán, Oaxaca.
23/12/1937	7.4	33	17.1	98.07	46 km al Suroeste de H Tlaxiaco, Oaxaca.
06/08/1942	7.9	50	14.8	91.3	93 km al Este de Cd. Hidalgo, Chiapas.
11/10/1945	6.5	95	18.32	97.65	31 km al Suroeste de Tehuacán, Puebla.
23/10/1950	7.2	33	14.3	91.8	56 km al Sureste de CD. Hidalgo, Chiapas.
23/08/1965	7.4	12	16.178	95.877	53 km al Noreste Crucecita, Oaxaca.
02/08/1968	7.3	16	16.6	97.8	9 KM al Noreste de Pinotepa Nacional, Oaxaca.
29/04/1970	7.3	44	14.463	92.683	62 km al Suroeste CD. Hidalgo, Chiapas.
29/11/1978	7.6	23	16.013	96.586	32 km al Noroeste S Pedro Pochutla, Oaxaca.
24/10/1980	7.1	65	18.174	98.222	19 km al Oeste de Acatlán de Osorio, Puebla.
20/10/1995	7.1	160	16.811	93.474	12 km al Noreste de Ocozocoautla, Chiapas.
24/02/1996	7.1	15	15.88	97.98	52 km al Sur de Pinotepa Nacional, Oaxaca.
20/03/2012	7.5	18	16.264	98.457	46 km al Sur de Ometepec, Guerrero
19/09/2017	7.1	51	18.329	98.671	8 km al Noreste de Chiautla de Tapia, Puebla.
16/02/2018	7.2	16	16.218	98.0135	14 km al Sureste de Pinotepa Nacional, Oaxaca

A lo largo de la sismicidad histórica destacan varios eventos que se han considerado como los más destructivos, esto de acuerdo con las pérdidas humanas y materiales, y se han documentado a través de periódicos, revistas y medios de transmisión. A continuación, se describen algunos de los sismos más importantes en la zona de estudio.

#### Sismo 3 de diciembre de 1920, M 6.4

El sismo del 3 de diciembre de 1920 a las 22:21:56 (hora local) tuvo su origen en la zona limítrofe de los estados de Veracruz y Puebla, tuvo una magnitud aproximada de  $M_w=6.4$  (SSN). Probablemente se debió a una falla local relativamente superficial con una profundidad no mayor que 10 km. (SSN). La zona afectada abarcó una amplia región entre los estados de Puebla y Veracruz. A pesar de que el temblor produjo el colapso de viviendas y edificios públicos, como iglesias y palacios de gobierno, el mayor número de víctimas fueron provocadas por grandes avalanchas de lodo generadas a lo largo del cauce del río Huitzilapan, ubicado a faldas del Pico de Orizaba.

### Sismo 28 de agosto de 1973, M 7.3

Este evento tuvo lugar el 28 de agosto de 1973 a las 03:50:41 (hora local) con una magnitud de  $M_w=7.3$ , su localización fue a 30 km al suroeste de Tierra Blanca, Veracruz (SSN). Afectó una superficie de 350 000 km<sup>2</sup> (Singh, S.K., Wyss, 1976). Las localidades afectadas del estado de Veracruz fueron Río Blanco, Orizaba y Córdoba, mientras en Puebla, Ciudad Serdán provocó 625 muertes (Hubp J, 2000). Los daños se ven reflejados en el colapso total de inmuebles como hospitales, escuelas, iglesias y viviendas. En la Figura 10, se observa un recorte fotográfico donde se muestran los daños que el evento causó.



*Figura 10. Edificio colapsado ubicado en Orizaba, Veracruz. Fotografía de Esteban Uribe Quintanar, Periódico El Sol de México, 29 de agosto de 1973. (Hemeroteca Nacional)*

### Sismo 15 de junio de 1999, M 7.0

El sismo ocurrido el 15 de junio de 1999, a las 15:42:04 (hora local) de magnitud  $M_w=7.0$  tuvo lugar a 29 km al suroeste de San Gabriel Chilac, Puebla, a una profundidad de 63 km (SSN). El sismo fue de profundidad intermedia a profunda, su mecanismo indica esfuerzos tensionales derivados de la interacción de las placas de Cocos y Norteamérica (Lomas, E., Uribe, A. y Fernández, 1999). Se sintió en una región que abarca parte de los estados de Oaxaca, Guerrero, México, Morelos, Tlaxcala y Veracruz. Provocando daños mayores en el estado de Puebla, especialmente en edificios antiguos de gran valor histórico, entre ellos, el templo de la Compañía, el Palacio de Justicia, el edificio de Correos, el Palacio Municipal entre otros. También fueron afectadas las poblaciones de Acatlán, Atlixco, Cholula, Izúcarde Matamoros, Tecamachalco, Tehuacán, Tepeji de Rodríguez y otras.

En Oaxaca, por el mismo evento, los daños afectaron la zona de la Mixteca, especialmente los municipios de Teposcolula, Huajuapán, Tlaxiaco, Nochixtlán, Cohixtlahuaca, Huautla de Jiménez y Cuicatlán. Mientras que en el Estado de México los daños se registraron principalmente en poblados

al pie de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatépetl, como Amecameca, Atzingo, Ozumba, Tepetlaxpa, entre otros. En Veracruz los daños principales fueron en Maltrata.

Los daños materiales son considerables, sin embargo, fueron mínimos los casos de derrumbe de construcciones.

#### Sismo 30 de septiembre de 1999, M 7.4

El 30 de septiembre de 1999, a las 11:31:13 (hora local) ocurrió un sismo de magnitud  $M_w=7.4$  con epicentro a 22 km al noreste de Puerto Escondido, Oaxaca (SSN). Lamentablemente, el estado de Oaxaca, también se ve afectado por sismos de profundidad intermedia de falla normal producto del rompimiento de la placa de Cocos ya subducida, como lo fue este sismo.

Los daños ocasionados por este evento impactaron directamente los municipios de San Gabriel Mixtepec, San Pedro Mixtepec, Santa Catarina Juquila, Puerto Escondido, Santa María Colotepec y la Ciudad de Oaxaca. De acuerdo con los reportes recuperados del informe técnico, del mismo sismo elaborado por el CENAPRED los principales inmuebles afectados fueron algunos palacios municipales, escuelas, hospitales, iglesias, infraestructura carretera, viviendas de mampostería de adobe y piedra artificiales, hoteles, comercios y un centro comercial ubicado en Puerto Escondido.



*Figura 11. Daño en edificación de adobe sin cerramiento entre muros ortogonales ocasionado por el sismo del 30 de septiembre de 1999, San Gabriel Mixtepec, Oaxaca.*

La Figura 12 representa los sismos mencionados en la Tabla 7, así como los descritos anteriormente, con sus respectivas características y especificaciones.

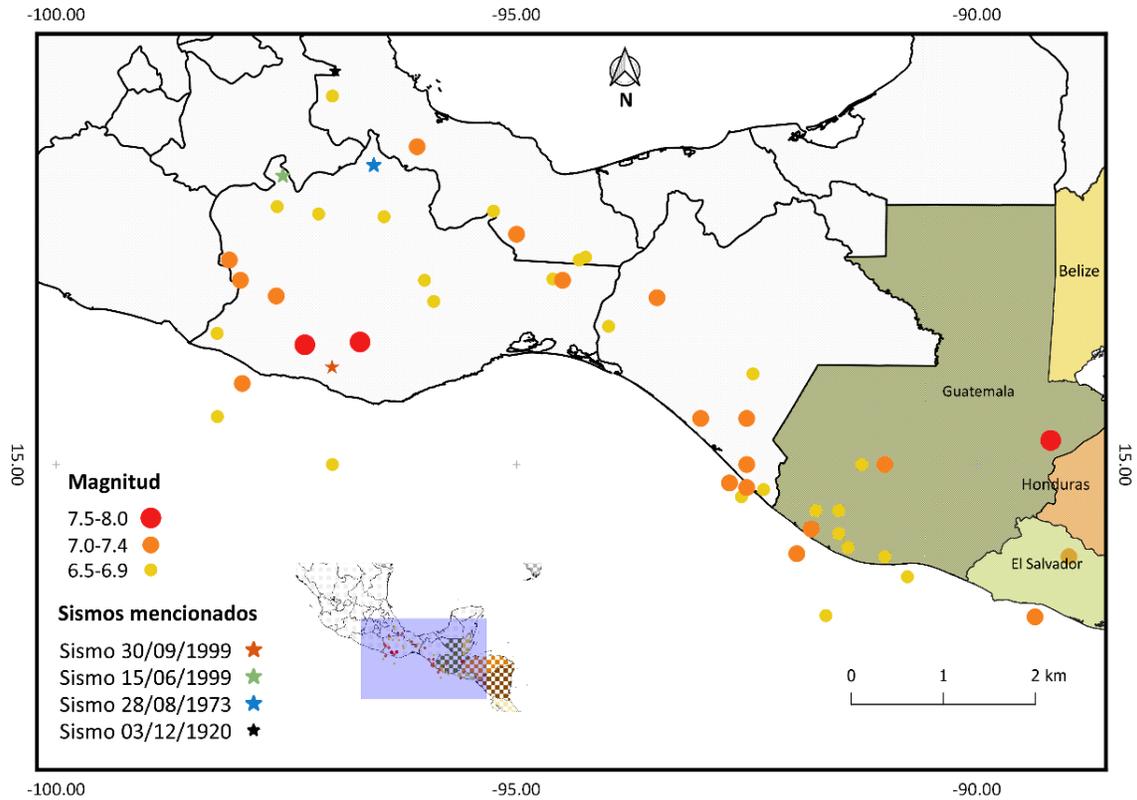


Figura 12. Mapa de la República Mexicana en donde se representan los epicentros de sismos con Magnitud mayor a 6.5 del periodo de 1900-2018 en la zona de estudio. Los puntos rojos corresponden a los epicentros en los estados de Puebla, Oaxaca y Chiapas.

### 2.3. Red Acelerométrica

Con el objetivo de mejorar la instrumentación sísmica a nivel mundial, el 5 septiembre de 1910 se fundó el Servicio Sismológico Nacional (SSN) quedando bajo el cargo del Instituto Geológico Nacional dependiente de la Secretaría de Minería y Fomento. Sin embargo, en 1929 paso a ser parte de la Universidad Nacional Autónoma de México, (UNAM) y en el año de 1948 quedó a cargo del Instituto de Geofísica de la UNAM.

Entre 1910 y 1923 se instalaron 9 estaciones sismológicas mecánicas autónomas (Figura 13). La central fue instalada en Tacubaya, D. F. y las foráneas en las ciudades de Oaxaca, Mérida, Chihuahua, Veracruz, Guadalajara, Monterrey y Zacatecas (SSN).

## Primeras Estaciones Autónomas



Figura 13. Primeras estaciones mecánicas instaladas en México, imagen SSN

Sin embargo, a partir de los daños observados por eventos históricos se tomó conciencia de la importancia de contar con instrumentación adecuada para registrar e interpretar estos fenómenos y entender las características de un sismo, por lo que en 1960 se instalaron los dos primeros acelerógrafos en la Ciudad de México; el primero ubicado en la Alameda Central y el otro en Ciudad Universitaria.

La información proporcionada por la instrumentación después del sismo de 1985 fue tan oportuna que, a partir de entonces, la instrumentación basada en acelerógrafos se convirtió en lo más completo para el estudio dinámico de suelos y estructuras, a través de modelos matemáticos planteados gracias a las mediciones instrumentales de eventos que posteriormente surgirían.

La Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería está compuesta por un conjunto de redes que se distribuyen en los estados de la República Mexicana donde se generan la mayoría de los sismos que afectan a la Cuenca del Valle de México. Por lo que *grosso modo* se presentan las siguientes subredes que conforman la Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería, UNAM (RAII-UNAM).

### Redes acelerográficas del Instituto de Ingeniería, UNAM

#### II-UNAM

- ✓ Red de Guerrero,
- ✓ Red de Acapulco
- ✓ Red de Oaxaca y Ciudad de Oaxaca
- ✓ Red del Valle de México
- ✓ Red de la Ciudad de Puebla y Ciudad de Puebla
- ✓ Red de Guadalajara
- ✓ Red del Centro (Guanajuato, Estado de México y Tlaxcala)
- ✓ Red del Oeste (Colima, Jalisco, Michoacán y Nayarit)

- ✓ Red del Golfo de Veracruz (Veracruz y Tabasco)
- ✓ Red del Sureste (Chiapas)

A partir de la Tabla 8 hasta la Tabla 13 se presentan las estaciones acelerográficas del Instituto de Ingeniería, UNAM que actualmente se encuentran en operación, y las cuales proporcionarán información útil sobre la demanda sísmica que afecto la zona de estudio.

i. Oaxaca

Tabla 8. Estaciones acelerográficas ubicadas en el estado de Oaxaca. RII-UNAM

Institución	Clave	Localidad		Coordenada	
		Nombre	Estado	Latitud, ° N	Longitud, °O
IINGEN	HUAM	HUAMELULA	OAXACA	16.03112	95.670
IINGEN	JAMI	JAMILTEPEC	OAXACA	16.28435	97.820
IINGEN	LANE	LAS NEGRAS	OAXACA	15.94768	97.187
IINGEN	NILT	NILTEPEC	OAXACA	16.56515	94.616
IINGEN	OAXM	OAXACA FACULTAD DE MEDICINA	OAXACA	17.08287	96.718
IINGEN	OXAE	OAXACA AEROPUERTO	OAXACA	17.00155	96.721
IINGEN	OXAL	ALAMEDA DE LEON	OAXACA	17.06148	96.726
IINGEN	OXBJ	ESCUELA PRIMARIA BENITO JUÁREZ	OAXACA	17.06734	96.723
IINGEN	OXCU	OAXACA CIUDAD UNIVERSITARIA	OAXACA	17.04888	96.713
IINGEN	OXJM	JALAPA DEL MARQUES	OAXACA	16.44519	95.444
IINGEN	OXLC	LAS CANTERAS	OAXACA	17.06504	96.703
IINGEN	OXPC	OAXACA PROTECCIÓN CIVIL	OAXACA	17.05122	96.722
IINGEN	OXPM	ESCUELA PRIMARIA MUGICA	OAXACA	17.06139	96.716
IINGEN	OXTO	INSTITUTO TECNOLOGICO DE OAXACA	OAXACA	17.07839	96.7441
IINGEN	OXXO	XOXOCOTLÁN	OAXACA	17.02623	96.7268
IINGEN	O	PUERTO ANGEL	OAXACA	15.66684	96.490
IINGEN	PNTP	PINOTEPA NACIONAL	OAXACA	16.34049	98.053
IINGEN	SCRU	SALINA CRUZ	OAXACA	16.18752	95.209
IINGEN	SMLC	SAN MARTIN LOS CANSECO	OAXACA	16.65497	96.729
IINGEN	TAMA	TAMAZULAPAN	OAXACA	16.26116	96.575

ii. Tabasco

Tabla 9. Estaciones acelerográficas ubicadas en el estado de Tabasco. RII-UNAM

Institución	Clave	Localidad		Coordenada	
		Nombre	Estado	Latitud, ° N	Longitud, °O

IINGEN	VHSA	VILLAHERMOSA SECUNDARIA IM ALTAMIRANO	TABASCO	17.98255	92.93875
--------	------	--	---------	----------	----------

iii. Ciudad de México

Tabla 10. Estaciones acelerográficas ubicadas en la Ciudad de México. RAI-UNAM

Institución	Clave	Nombre	Localidad		Coordenada	
			Estado		Latitud, ° N	Longitud, °O
IINGEN	CCCL	CENTRO CULTURAL UNIVERSITARIO TLATELOLCO CAMPO LIBRE	DISTRITO FEDERAL		19.44986	99.1379
IINGEN	CTCL	CATEDRAL CAMPO LIBRE	DISTRITO FEDERAL		19.43452	99.1331
IINGEN	CUP1	IDEI PATIO 1	DISTRITO FEDERAL		19.33024	99.1818
IINGEN	SCT2	SCT B-2.	DISTRITO FEDERAL		19.39469	99.1486
IINGEN	TACY	TACUBAYA	DISTRITO FEDERAL		19.4045	99.1952

iv. Chiapas

Tabla 11. Estaciones acelerográficas ubicadas en el estado de Chiapas. RAI-UNAM

Institución	Clave	Nombre	Localidad		Coordenada	
			Estado		Latitud, ° N	Longitud, °O
IINGEN	CHPA	PREPARATORIA ARRIAGA	CHIAPAS		16.24737	93.91257
IINGEN	PIJI	PIJIJAPAN	CHIAPAS		15.69014	93.20736
IINGEN	SCCB	SAN CRISTOBAL DE LAS CASAS CB 11	CHIAPAS		16.70858	92.62552
IINGEN	TAJN	TAPACHULA JARDIN DE NINOS JM VILLALPANDO	CHIAPAS		14.92268	92.27096
IINGEN	TGBT	TUXTLA GUTIERREZ CBTIS 144	CHIAPAS		16.77681	93.08949

v. Puebla

Tabla 12. Estaciones acelerográficas ubicadas en el estado de Puebla. RAI-UNAM

Institución	Clave	Nombre	Localidad		Coordenada	
			Estado		Latitud, ° N	Longitud, °O
IINGEN	THEZ	TEHUACAN ESCUELA PRIMARIA EMILIANO ZAPATA	PUEBLA		18.47755	97.38319
IINGEN	PHPU	PARQUE HABANA, PUEBLA	PUEBLA		19.04422	98.16846
IINGEN	PZPU	CERRO LA PAZ, PUEBLA	PUEBLA		19.05538	98.22709
IINGEN	RABO	RABOSO	PUEBLA		18.56908	98.44541
IINGEN	SXPU	SISMEX PUEBLA	PUEBLA		19.03994	98.21509

vi. Veracruz

Tabla 13. Estaciones acelerográficas ubicadas en el estado de Veracruz. RAI-UNAM

Institución	Clave	Nombre	Localidad		Coordenada	
			Estado		Latitud, ° N	Longitud, °O
IINGEN	MIHL	MINATITLAN ESCUELA HIJAS DE LERDO	VERACRUZ		17.98878	94.54387
IINGEN	OZST	ORIZABA ESCUELA SECUNDARIA TÉCNICA NÚM. 84	VERACRUZ		18.86076	97.09412
IINGEN	SODO	SOLEDAD DE DOBLADO	VERACRUZ		19.04432	96.41477
IINGEN	XALA	XALAPA	VERACRUZ		19.52987	96.90197

En la Figura 14 se presenta un mapa con localización geográfica de las estaciones acelerográficas del Instituto de Ingeniería, UNAM que comprenden la zona estudiada.

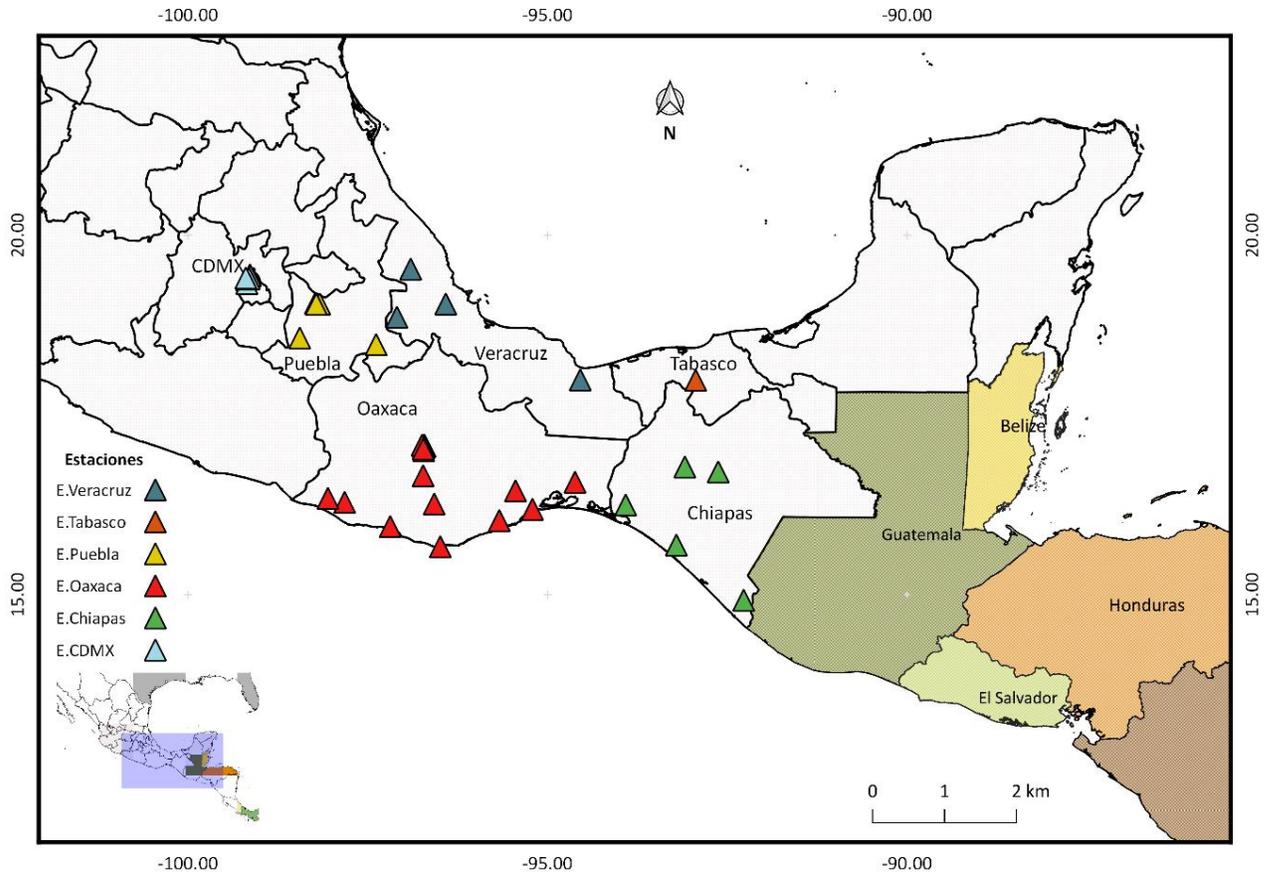


Figura 14. Mapa de la República Mexicana con la localización de las estaciones acelerográficas del II-UNAM. Los triángulos verdes corresponden a las estaciones ubicadas en el estado de Chiapas; los azules a las de Oaxaca; las anaranjadas al estado de Puebla; los verdes más claros a Veracruz y el triángulo rojo a Tabasco.

#### 2.4. Descripción del evento

El Servicio Sismológico Nacional (SSN) reportó que este sismo tuvo lugar el 7 de septiembre del 2017 con una magnitud 8.2, localizándose en el Golfo de Tehuantepec, a 133 km al suroeste de Pijijiapan, Chiapas. Este evento, ocurrido a las 23:49:18 horas (hora local), fue sentido en el sur y centro del país. Las coordenadas del epicentro son 14. 85º latitud N y 94. 11º longitud W con una profundidad de 58 km (Figura 15). El mecanismo focal del sismo muestra una falla de tipo normal, característica de un sismo intraplaca (rumbo=311, echado=84.4, desplazamiento=-94.7) como se observa en la Figura 16.

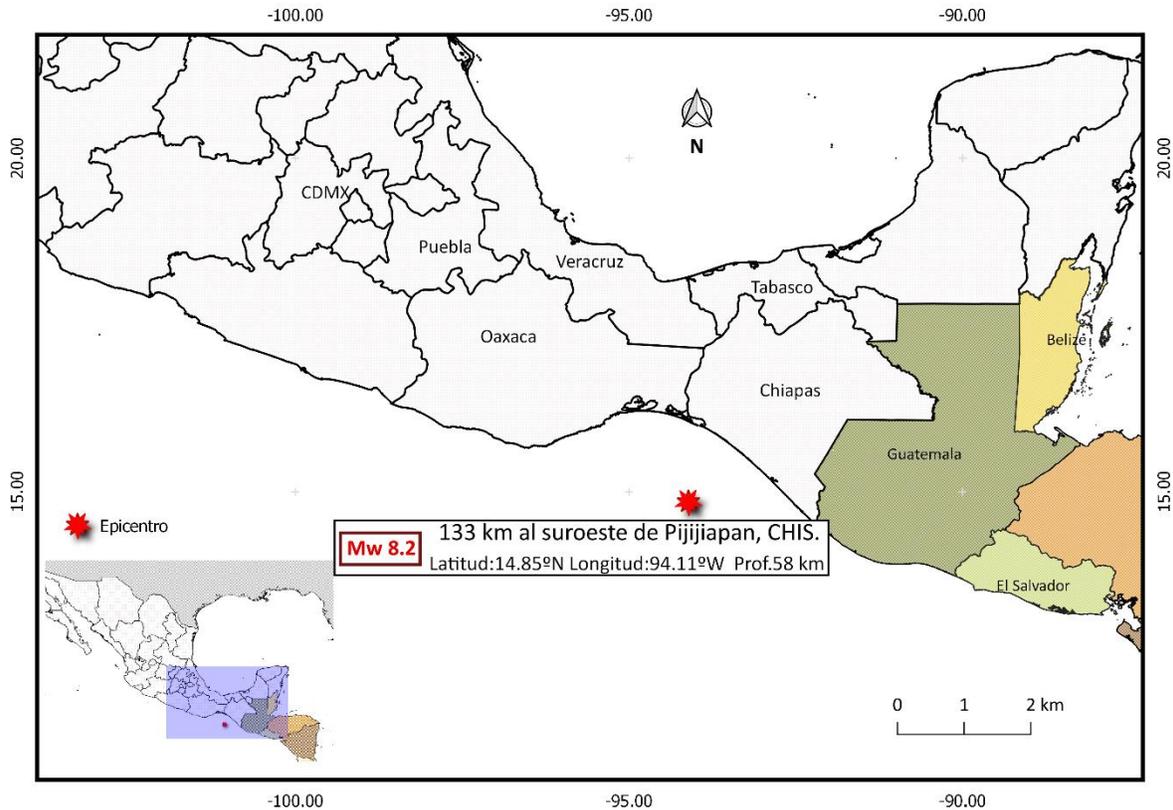


Figura 15. Epicentro del sismo del 7 de septiembre 2017, (SSN, 2017)

Este sismo se clasifica como el evento intraplaca más fuerte registrado hasta el momento en México, con magnitud de  $M_w$  8.2, y el tercer evento intraplaca más grande conocido mundialmente (Wiens, D. A., 1998). Si bien es raro que se presenten eventos de fallas normales poco profundas, estos también suelen llamarse terremotos de ascenso exterior y son de interés debido a los peligros relacionados con la geodinámica en las zonas de subducción. La gran mayoría de estos eventos ocurren hacia el mar y debido a su poca profundidad, son generadores de tsunamis. Las fallas normales son producto de la flexión y penetran a través de toda la corteza oceánica a unos 10 km aproximadamente, superiores al manto oceánico (Ranero, C. y Morgan, 2003). De acuerdo con imágenes electromagnéticas marina se ha confirmado la hidratación del manto superior (Naif, S., Key, K., Constable, S. y Evans, 2015) que está asociada con las fallas de ascenso externo que sirve como vía para facilitar el paso del agua de mar a las profundidades del manto, lo que da lugar al proceso de serpentización del manto litosférico formando así minerales de serpentinita hidratados. Por lo que, a medida que la placa oceánica se subduce, se producen reacciones de deshidratación de minerales que conducen a una alta presión de poro (Ranero, C., Villaseñor, A., Phipps y Morgan, 2005) lo que ocasiona la fragilidad de este material (Peacock, 2001). Es decir, que algunas fallas o grietas preexistentes en el manto se hidrataron antes del movimiento, causando el rompimiento profundo.

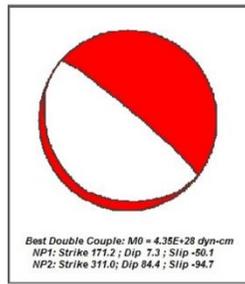


Figura 16. Mecanismo focal del temblor del 7 de septiembre 2017, (SSN, 2017).

En un cálculo de la curvatura de la placa, el evento se localiza lejos del punto de máxima curvatura y se rompe donde actualmente se produce flexión de la placa (Figura 17). Dada la longitud y anchura del sismo ocurrido el pasado 7 de septiembre, se considera que el evento rompió planos existentes heredados por el ascenso exterior de la región. Actualmente hay una ruptura de falla normal (extensional) que abarca toda la litosfera en donde la curvatura es alta mediante porciones que debería estar a compresión.

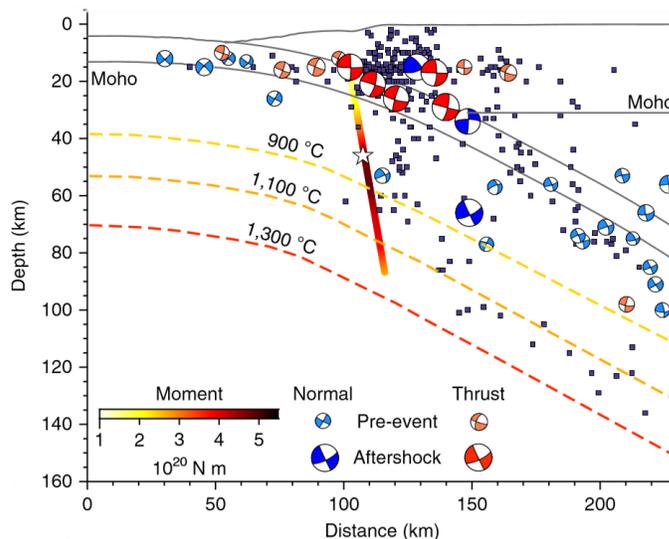


Figura 17. Fragilidad profunda durante la ruptura. Las líneas discontinuas representan los puntos de igual temperatura. La estrella blanca corresponde al hipocentro del evento principal. Los cuadros azules oscuros son lugares de réplica. Las líneas negras indican las costras oceánicas y continentales (Melgar et al., 2018).

De acuerdo con las observaciones sismológicas y geodésicas, el sismo de 2017 rompió casi toda la litosfera oceánica, incluyendo el manto y la corteza en un solo evento. Es posible que esto haya ocurrido antes, con el sismo de falla normal de 1931,  $M_w$  8.0 Oaxaca donde rompió toda la litosfera (Singh, S. y Suarez, 1985). Ambos eventos son parte de un colapso continuo de la placa, sin embargo, los sismogramas históricos limitados dificultan esa determinación.

### 2.4.1. Réplicas

El sismo estuvo acompañado por 9369 sismos, de los cuales 4737 son asociados como réplicas (SSN 2017) éstas casi inmediatamente del sismo principal a lo largo del plano de falla. En la Figura 18 se observan las réplicas que se habían observado hasta el 25 de noviembre, mostrando las dos réplicas mayores, la primera ocurrió el 8 de septiembre a las 00:24 horas y se localizó a 72 km al sureste de Salina Cruz. La segunda ocurrida el 23 de septiembre a las 07:52 horas en las cercanías de Unión Hidalgo, Oaxaca, alcanzando magnitudes de 5.8 y 6.1, respectivamente.

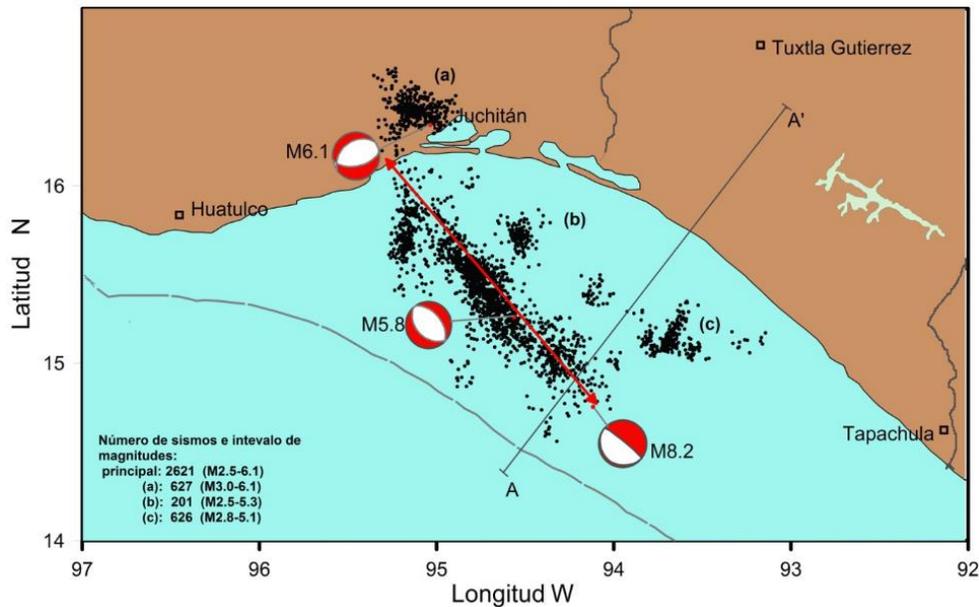


Figura 18. Réplicas reportadas por el SSN, hasta el mes de noviembre de 2017. Se incluyen los tres principales mecanismos focales. La línea roja indica la longitud de la falla correspondiente al sismo principal. El perfil A-A' se muestra en la Figura 19

Poco después del sismo principal se registraron una gran cantidad de réplicas a lo largo del plano de falla con longitud de aproximadamente 230 km. Tan sólo dos días después se registraron 482 réplicas y quince días después, se habían registrado 4326 réplicas cuya distribución abarca todo el Golfo de Tehuantepec. Paralelamente a este evento ocurrieron una serie de enjambres.

En la Figura 19 se describe una sección perpendicular a la Trinchera Mesoamericana, (corte A-A'), esta representa el hipocentro del sismo principal con una estrella azul. Los círculos rojos marcan dos tendencias de las réplicas, que sugieren que el sismo rompió la litosfera completa. Los puntos negros corresponden a sismicidad histórica ocurridos entre 2000 a 2016. La zona sombreada en azul da una idea de la geometría de la placa de Cocos bajo la placa de Norteamérica.

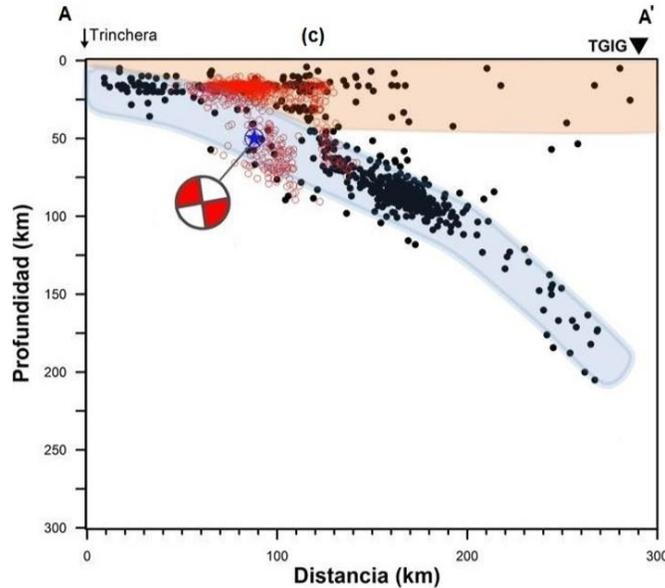


Figura 19. Sección epicentral perpendicular a la trinchera mesoamericana. El hipocentro del sismo principal representado con un círculo-estrella azul y se observan las tendencias de dos fallas paralelas. Los puntos negros son hipocentros de otros eventos sísmicos en la región (SSN, 2017).

#### 2.4.2. Tsunamis

El sismo del 7 de septiembre del 2017 generó un tsunami que se registró en las estaciones de medición de mareas de México a lo largo del Océano Pacífico ((SMN), 2017; Center., 2017)

Mediante un modelo que sirve como indicador de marea y el estudio posterior al evento, cinco días después abarcando los sitios con mayores alturas de olas proyectadas por el modelo preliminar al tsunami. El estudio cubrió 41 km de la costa de Chiapas dentro del Golfo de Tehuantepec realizando encuestas a testigos mediante protocolos establecidos por la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (International Tsunami Survey Team, 2014) y mediciones que ayudarán a documentar las distancias de inundación del tsunami, así como la erosión y deposición. Las distancias de avance y de inundación se midieron con un GPS RTK y utilizando un nivel Sokkia B40 a lo largo de ocho sitios: PA1 y PA2 Puerto Arista 1 y 2, PS1 Playa del Sol, BC1, 2 y 3 Boca del Cielo 1, 2 y 3, MS1 y MS2 Madre Sal 1 y 2 mostrados en la Figura 20. Corrigiendo los datos con niveles de marea astronómicos (SMN, 2017). La utilización de dos drones (modelos Quantum y F550) fueron de gran utilidad para documentar la inundación del tsunami y los efectos físicos del tsunami en la morfología de la costa en áreas con acceso limitado. El tsunami y las perturbaciones relacionadas con el mar duraron casi 48 horas.

El Sistema mexicano de alerta temprana de tsunami (CAT - Centro de Alerta de Tsunami), creado en abril de 2012, es responsable de emitir boletines de alerta de tsunami en zonas que se encuentran bajo la amenaza de dicho evento. El CAT emitió 12 boletines de alerta de tsunami el 8 de septiembre

de 2017, el primero a las 23:58:26 (hora local), es decir, 9 minutos y 5 s después del sismo, y el último boletín a las 15:30 (hora local), (CAT 2017). Según fuentes oficiales, miles de personas fueron evacuadas de la costa (principalmente en grandes ciudades, por ejemplo, Tapachula. Sin embargo, la alerta temprana de tsunami no llegó a todas las comunidades, en especial a la más pequeñas de Oaxaca y Chiapas, excepto una; Boca del Cielo ya que esta cuenta con una estación naval y así poder ser evacuada. En comunidades como San Mateo del Mar, Oaxaca la gente ante el movimiento del terreno advirtieron de un posible tsunami por medio de aplicaciones locales de teléfonos celulares y fue así como se trasladaron a lo más alto del terreno. Según reportes de los lugareños, los daños producidos fueron a causa del propio sismo y no por el tsunami.

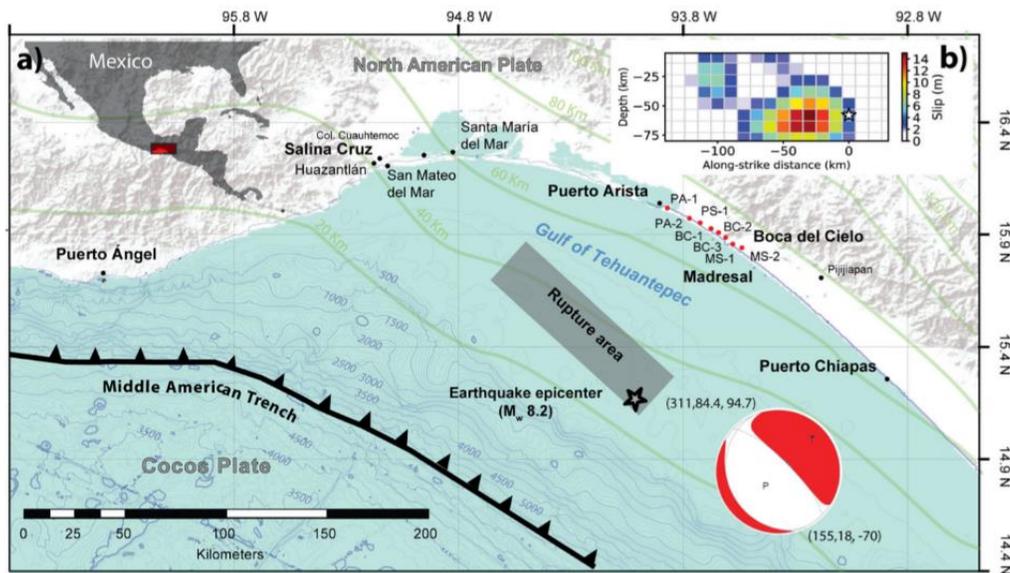


Figura 20. Mapa de la placa de Cocos subducida a lo largo de la Trinchera de América Central y la placa Norteamericana. La estrella representa el epicentro del sismo del 7 de septiembre 2017; rectángulo sombreado en gris: área de ruptura; pelota de playa: Mecanismo focal de una falla normal. Inciso a) área de estudio; b) modelo de inversión de fuente; puntos rojos: sitios de estudio posterior al tsunami PA1, PA2, PS1, BC1, BC2, BC3, MS1 y MS2. Líneas verdes: Contorno de profundidad de placa. (Hayes, 2012)

## 2.5. Mapas de intensidades del sismo

Los efectos sísmicos son representados en mapas que indican las zonas que tuvieron las mismas intensidades y cómo se distribuyen, las cuales están indicadas con diferentes colores. Después de un movimiento como este se producen muchas intensidades que son una medida instrumental. Para la creación de estos mapas se utiliza la información que proporcionan instituciones como el Servicio Sismológico Nacional.

El objetivo principal de la creación de mapas de intensidad es proporcionar información acertada que ayude a las autoridades a saber los sitios más afectados o si se han producido daños estructurales y así dirigir la ayuda más rápida y oportunamente.

La idea es crear mapas de intensidad casi en tiempo real, muy poco tiempo después de ocurrido el evento, por lo que debe implicar registrar las aceleraciones tomadas en campo y después ser llevadas a un centro de datos de manera automática y a través de programas especializado, generar los mapas de intensidad y así poder difundirlos (Ordaz, 2017).

La Figura 21 muestra el mapa de intensidades estimadas elaborado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, como se puede apreciar, las intensidades máximas se encuentran en la región del Golfo de Tehuantepec, por lo que las ciudades costeras en esa región fueron las más afectadas por el sismo.

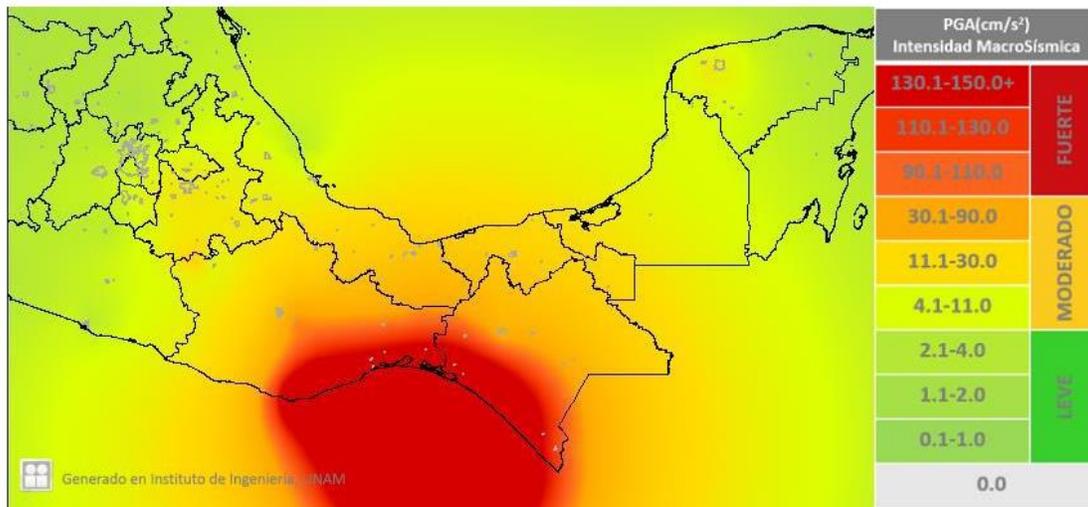


Figura 21. Mapa de intensidades del sismo del 7 de septiembre de 2017, (Instituto de Ingeniería, 2017).

Los mapas presentan intensidades sísmicas, es decir, medidas locales de la severidad del movimiento que se experimentaría en el suelo o en la azotea de edificios de diferentes alturas. Cuanto mayor las intensidades, mayores las fuerzas que el sismo impondrá a los edificios. Sin embargo, el daño que sufra un edificio depende tanto de la severidad del movimiento como de la resistencia del propio edificio (II-UNAM).

## 2.6. Demanda sísmica

La demanda sísmica es la intensidad efectiva que entra a la estructura ante una excitación sísmica descrita ya sea por aceleraciones, velocidades o desplazamientos o energía liberada que se presenta en el suelo sobre el que está desplazada. La amplitud de la vibración necesaria para disipar esa energía depende de las características del sistema constituido por el conjunto sub-suelo-cimentación-estructura-elementos no estructurales. Desde el punto de vista del diseño estructural interesa esencialmente la máxima sollicitación a la que se verá sujeta la estructura por efecto del sismo (Meli, 2002).

De acuerdo con el reporte de la Unidad de Instrumentación Sísmica (UIS-II-UNAM, 2017), la aceleración máxima del suelo (PGA) fue de 488.63 Gal y se registró en la estación NILT, localizada

en Santiago Niltepec, Oaxaca a 200 km del epicentro. Sin embargo, este valor no se tomará como referencia debido a la saturación del instrumento. En la estación SCRU, ubicada en Salina Cruz, Oaxaca a unos 190 km del epicentro se registró una aceleración máxima del suelo (PGA) de 293.29 Gal (Figura 22), mientras que en la estación PANG en Puerto Ángel, a unos 270 km del epicentro se registró una aceleración máxima del suelo (PGA) de 228.77 Gal. En Chiapas, la estación TAJN, en Tapachula, Chiapas a 200 km del epicentro, se registró una PGA de 110.68 Gal. Estas aceleraciones podrían estar relacionadas con los niveles de daño observados en los sitios afectados.

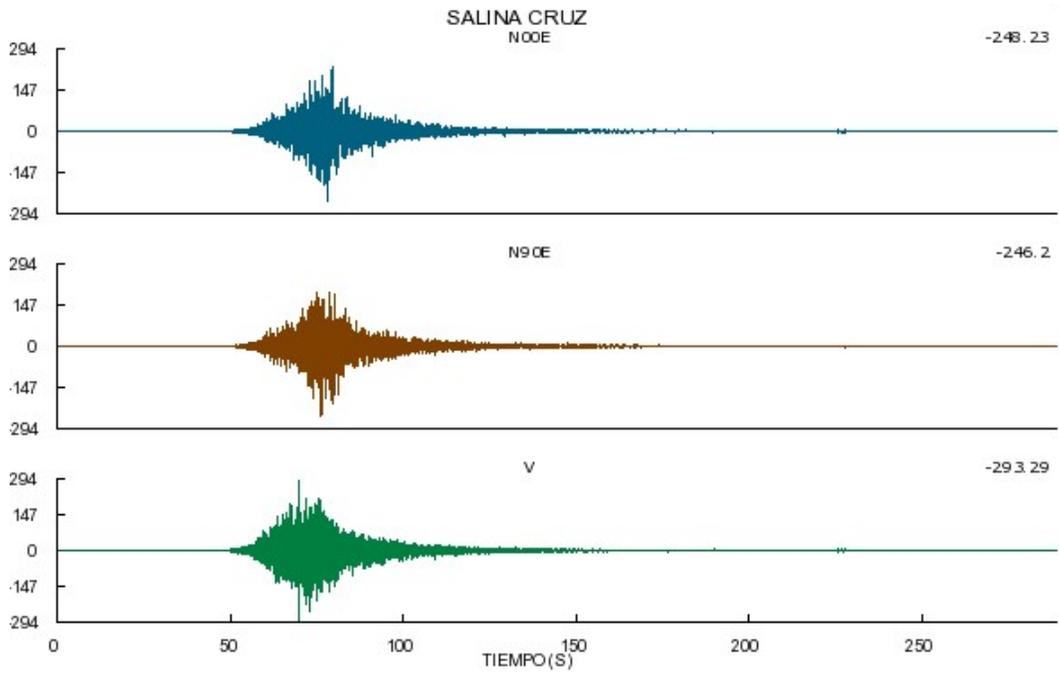


Figura 22. Gráfica del Acelerograma en sus dos componentes horizontales y una en dirección vertical, correspondiente a la estación SCRU ubicada en Salina Cruz, Oaxaca (UIS-II-UNAM, 2017).

En la Figura 23. se muestran los espectros de respuesta para las estaciones PANG y TAJN, respectivamente. Dando lugar a frecuencias altas que producen intensidades grandes para estructuras de períodos cortos. Esto podría causar daños no solo en elementos estructurales, sino también a elementos y contenidos no estructurales, que en algunos casos pueden ser significativamente más caros que el daño estructural (Taghavi S, 2003).

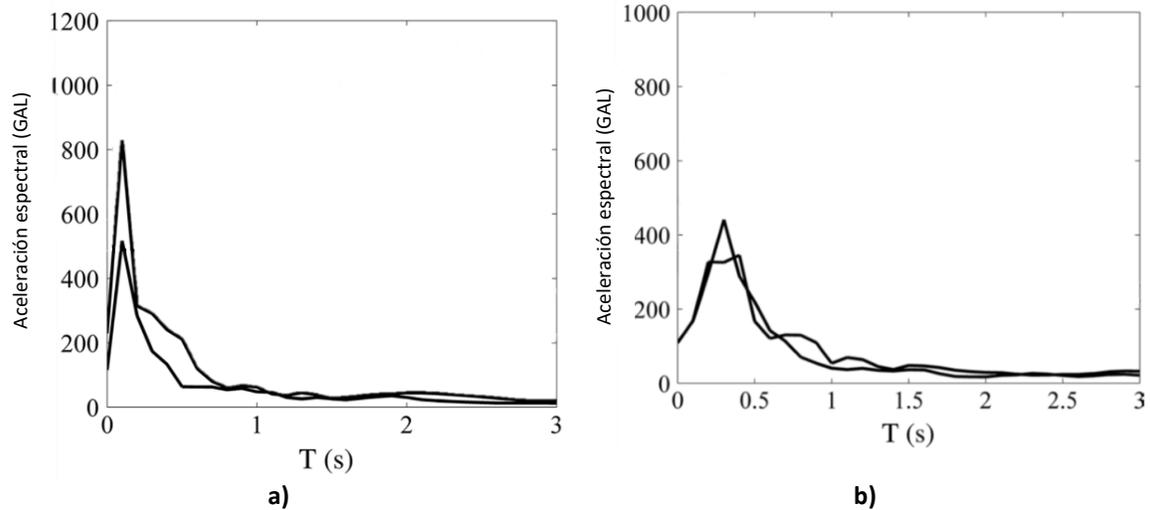


Figura 23. Espectro de respuesta (relación de amortiguamiento  $\xi = 5\%$ ) para el sismo de  $M_w$  8.2 de 2017 para las siguientes estaciones, a) estación PANG ubicada en Puerto Ángel, Oaxaca.; b) estación TAJN ubicada en Tapachula, Chiapas.

Las principales observaciones de estos estudios nos dicen que, para frecuencias altas de un sismo de profundidad intermedia, (sismo de  $M_w$  8.2 de 2017) se produce una mayor contribución a los modos más altos en la respuesta estructural y grandes intensidades sísmicas para estructuras de período corto. Haciendo que los eventos de fallas normales predominen el peligro sísmico en la Ciudad de México y otras localidades de México por periodos de vibrar menores a 0.7 s.

La Figura 24 representa la comparación de los espectros de respuesta para las estaciones PANG y TAJN (líneas negras) con el espectro de diseño de acuerdo con el manual de obras civiles para diseño sísmico (MDOC-DS) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE-1993,2015) representado por la línea azul y roja, respectivamente. Este manual es utilizado generalmente para el diseño, ya que no hay un estándar de diseño sísmico específico para esta región.

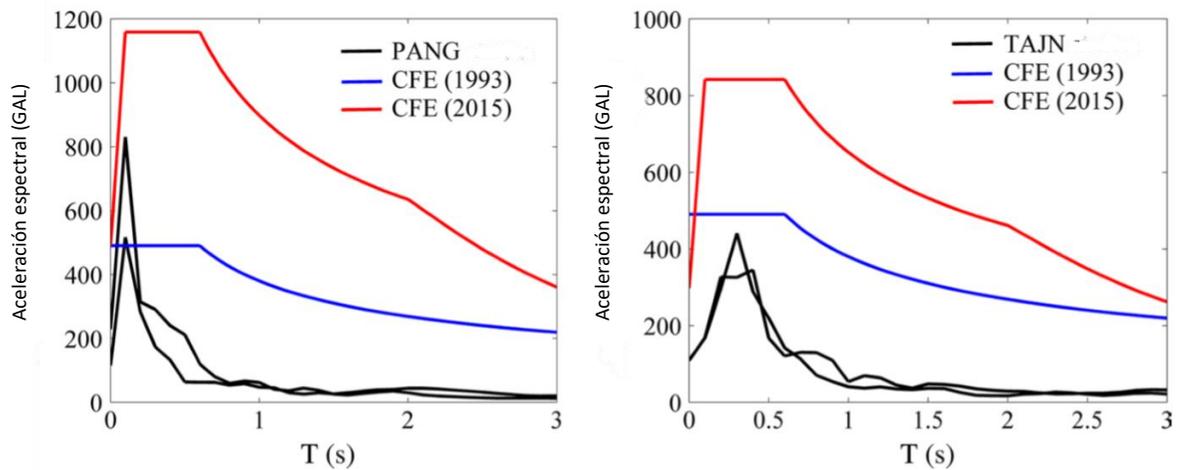


Figura 24. Espectro de respuesta (relación de amortiguamiento  $\xi = 5\%$ ) para el sismo de  $M_w$  8.2 de 2017 para dos estaciones, mencionadas en la Figura 23 comparadas con el espectro de diseño correspondiente con el manual de obras civiles para diseño sísmico (CFE 2003,2005).

En dichos espectros puede observarse que, los valores del espectro de diseño sísmico de CFE (1993) para la estación PANG fueron excedidos por los valores de los espectros de respuesta para períodos de vibración  $<0.5$  s, sin embargo, en el espectro de diseño de CFE (2015) envuelve el espectro de respuesta en esta estación. Por otro lado, para los valores de los espectros de respuesta en la estación TAJN fueron envueltos por ambos espectros de diseño sísmico de CFE (1993, 2015). Por lo que, que a medida que se estudian dichos eventos sísmicos a lo largo del tiempo es posible mitigar daños en las estructuras aplicando adecuadamente los manuales de obras civiles existentes además de emplear buenas prácticas en su construcción, la cual se verá en el siguiente capítulo.

Derivado al estudio de este capítulo puede concluirse que poseer un conocimiento acertado sobre la sismicidad histórica y la tectónica de placas involucradas en esta zona, es una herramienta útil que nos ayuda a estudiar y entender los aspectos sismológicos con el fin de mitigar los daños ocasionados por esta clase de eventos, sin embargo, como se mencionó a lo largo de este capítulo, este conocimiento no se poseía, por lo que, el daño ocasionado ha cobrado pérdidas humanas y económicas.

### 3. Capítulo 3. Daños derivados del sismo

Estudiar los daños presentados después de la ocurrencia de un sismo es muy importante. A partir de este tipo de estudios se pueden identificar patrones en la distribución de los daños dentro de la zona de estudio. Identificar estos patrones en términos de materiales de construcción, tipos estructurales, año de construcción y patologías estructurales, entre algunos otros, es de gran utilidad, para entender de mejor manera los fenómenos sísmicos y sus efectos en las estructuras, además de poder establecer planes de acción que minimicen los daños de los próximos eventos sísmicos.

En este capítulo se presenta información de los daños que el sismo del 7 de septiembre de 2017 ocasionó en los estados que comprende la zona de estudio: Chiapas, Oaxaca, Tabasco, Veracruz, Puebla y CDMX.

Para recabar toda la información aquí mostrada se realizó una búsqueda, principalmente a través de tecnologías de información y comunicación, herramientas fundamentales para compartir, procesar y almacenar información digitalizada. Mediante diversos medios electrónicos y por medio de diferentes redes sociales como Facebook, Twitter, Instagram, YouTube, Pinterest y Flickr se recabaron datos sobre viviendas, comercios, iglesias, palacios municipales, mercados públicos, zonas arqueológicas, bibliotecas, puentes y tramos carreteros dañados por el sismo del 7 de septiembre de 2017. Por otro lado, a través de la declaratoria emitida por la secretaria de Gobernación (SEGOB) para diversos estados de emergencia en las entidades federativas con mayores daños; Chiapas con 118 municipios en estado de emergencia y Oaxaca con 41 municipios, se delimitó un poco más la búsqueda enfocándose más en estas zonas.

A continuación se describe con mayor detalle la metodología empleada para la reclamación de datos derivados por la ocurrencia del sismo magnitud 8.2, el día 7 de septiembre de 2017:

#### I. Selección por entidad federativa

La recopilación de datos se organizó por entidad federativa a las cuales se le denominan macrozonas abarcando los estados involucrados en la zona de estudio (Chiapas, Ciudad de México, Oaxaca, Puebla, Tabasco y Veracruz).

#### II. Selección por municipio

Una vez delimitadas macrozonas, se realizó una zonificación por municipio, y dado el caso se priorizaba la búsqueda por la declaratoria de emergencia; para el caso de los estados no declarados en estado de emergencia, éstos se georreferenciaron con la finalidad de conocer la influencia del sismo dada su distancia epicentral, así se logró delimitar más el espacio de búsqueda. Finalmente, para algunos otros casos específicos se realizó una búsqueda de información a nivel localidad.

### III. Búsqueda en diferentes medios (redes sociales y buscadores de internet)

De acuerdo con las delimitaciones geográficas (entidad y municipio y en algunos casos localidades), la investigación fue más específica y a través de los diversos medios y redes sociales se hizo la búsqueda. Un claro ejemplo es el de Twitter, que a partir de su configuración de búsqueda avanzada filtra los datos por tiempo, usuario y palabras involucradas, la cual hace más fácil y precisa la recabación de datos mediante al reporte de usuarios, los cuáles compartían información que abarcaba fotografía, dirección y alguna descripción del inmueble, puente o tramo carretero dañado. Y en otros casos, aparecían enlaces que direccionan a artículos en línea con más información. Para el caso de Facebook, los municipios cuentan con páginas oficiales dentro de esta red social, en donde se registraron los daños presentados de acuerdo con el municipio y en algunos otros, gracias a los *posts* de usuarios que reportaban a partir de sus cuentas se recopiló información. Para otros sitios web como Instagram, Flickr y Pinterest se extrajeron fotografías con algunas ubicaciones y en muy contados casos se contó con una descripción, ya que estos sitios son usados frecuentemente solo para compartir fotografías. Finalmente, YouTube fue una de las herramientas más útiles en la investigación ya que a través de vídeos posteados por diversos usuarios recorrían las calles presentando los inmuebles dañados.

Adicionalmente se recabó información de forma complementaria a los registros, a través de la consulta de una plataforma de carácter (Fuerza México, 2017). Mediante la secretaria de Educación Pública (SEP) se recopiló información de escuelas y por parte del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) información de infraestructura afectada del sector salud.

Los principales problemas encontrados en esta fase fue la falta de información concisa, es decir, la mayoría de las veces solo se encontraba la fotografía con la ubicación del municipio, y en otros casos la dirección detallada, pero sin fotografías.

Un gran reto fue verificar la confiabilidad de la información, ya que para poder registrar cada uno de los datos se debía verificar la dirección en Google Earth y fotografía.

### IV. Obtención de la fotografía

Ya que la recopilación de fotografías que presentaron daños es indispensable para el estudio de los daños derivados del sismo del 7 de septiembre de 2017. Por lo anterior se elaboró un álbum fotográfico con más de 1300 imágenes de los daños presentados.

Como se mencionó anteriormente, en algunos casos no se contaba con la imagen del lugar, por lo que se descartaba dicho dato, debido a que la fotografía era la manera más confiable de verificar la información, además de que, la imagen es medular para el estudio de los daños.

En algunos casos, la calidad de las fotografías en algunos casos no es la mejor, debido a que se tomaron capturas de pantalla de algunos vídeos o simplemente la calidad del archivo fuente no era buena.

## V. Verificación de la ubicación geográfica

Para muy pocos registros se contaba con la localización geográfica, por lo que en la mayoría de los registros se procedió a la búsqueda del inmueble mediante rasgos del medio en el que se encontraba, en algunos se logró la identificación de la dirección localizada, y en algunos otros no, solo se logró definir la información hasta nivel la localidad. En el caso de los vídeos, los recorridos se realizaban a través de Google Earth de manera simultánea al vídeo para identificar la ubicación.

## VI. Registro en la base de datos

Los datos obtenidos se registraron en una base de datos albergada una hoja de cálculo del programa Excel, con la que se trabajó en adelante para abundar en la investigación de esta tesis. Más adelante se describirán con detalle los campos involucrados en la base de datos.

Se logró obtener un total de 517 registros de inmuebles dañados, así como 20 registros de tramos carreteros y puentes. Es importante aclarar que la información recabada no es el total de estructuras dañadas; sin embargo, se considera que está información es suficiente y útil para elaborar estudios estadísticos de los daños derivados del sismo.

### 3.1. Descripción de los campos que conforman la base de datos

La base de datos utilizada para el estudio de los daños derivados del sismo se resume en la *Tabla 14*

*Tabla 14. Campos mencionados en la base de datos*

<u>Descripción de los campos mencionados en la base de datos</u>	
<u>Campo</u>	<u>Descripción</u>
<b>Clave</b>	Clave alfanumérica única para cada inmueble. Dicha clave se basa el municipio y un número identificador.
<b>Nombre</b>	Nombre de la estructura dañada
<b>Coordenadas geográficas</b>	Latitud y Longitud de la estructura dañada
<b>Dirección</b>	Domicilio de la estructura, con las siguientes especificaciones: calle, número, entrecalle y colonia.
<b>Municipio</b>	Municipio en el que se encuentra la estructura dañada
<b>Entidad Federativa</b>	Entidad federativa en el que se encuentra la estructura dañada
<b>Número de niveles</b>	Corresponde al número de niveles de la estructura dañada
<b>Uso del inmueble</b>	Uso de la estructura
<b>Tipo de estructuración</b>	Clasificación del sistema estructural de acuerdo con los materiales y la tipología de los elementos estructurales que componen a la estructura

<b>Observación del daño</b>	Notas que se consideran relevantes para la clasificación del daño
<b>Estado de daño</b>	Corresponde a un nivel de daño cualitativo que describe y agrupa las características del daño presentado.
<b>Patologías estructurales</b>	Patología estructural identificada en la estructura dañada.
<b>Fuente</b>	Fuente bibliográfica o digital consultada para obtener la información.

---

### 3.2. Estadísticas de daños presentados

Con la información derivada de la recopilación de los daños ocurridos durante el sismo del 7 de septiembre de 2017 y que está presente en la base de datos, se desprende la siguiente información.

#### 3.2.1. Edificios

Los registros se agruparon con base a las características de las estructuras y de los daños observados. Es decir, fue necesario catalogar a los inmuebles estudiados con la finalidad de desechar fuentes de incertidumbre obvias en los patrones en la distribución de los daños, más adelante se detallará este punto.

##### 3.2.1.1. Distribución de los daños en edificios por entidad federativa

En la Figura 25 se presenta un mapa con la distribución de los daños derivados de la ocurrencia del sismo del 7 de septiembre de 2017, la realización del mapa se hizo a través de los registros acelerográficos proporcionados de las labores de instrumentación y procesamiento de la Unidad de Instrumentación Sísmica del Instituto de Ingeniería de la UNAM y con la información de los inmuebles recopilados para esta tesis los cuales fueron clasificados de acuerdo con el estado de daño presentado el cuál se estudiará más adelante. Como se observa, los estados de daño graves y colapsos parciales están localizados en donde se concentran las mayores aceleraciones del terreno, correspondientes a aceleraciones mayores a 180 gal.

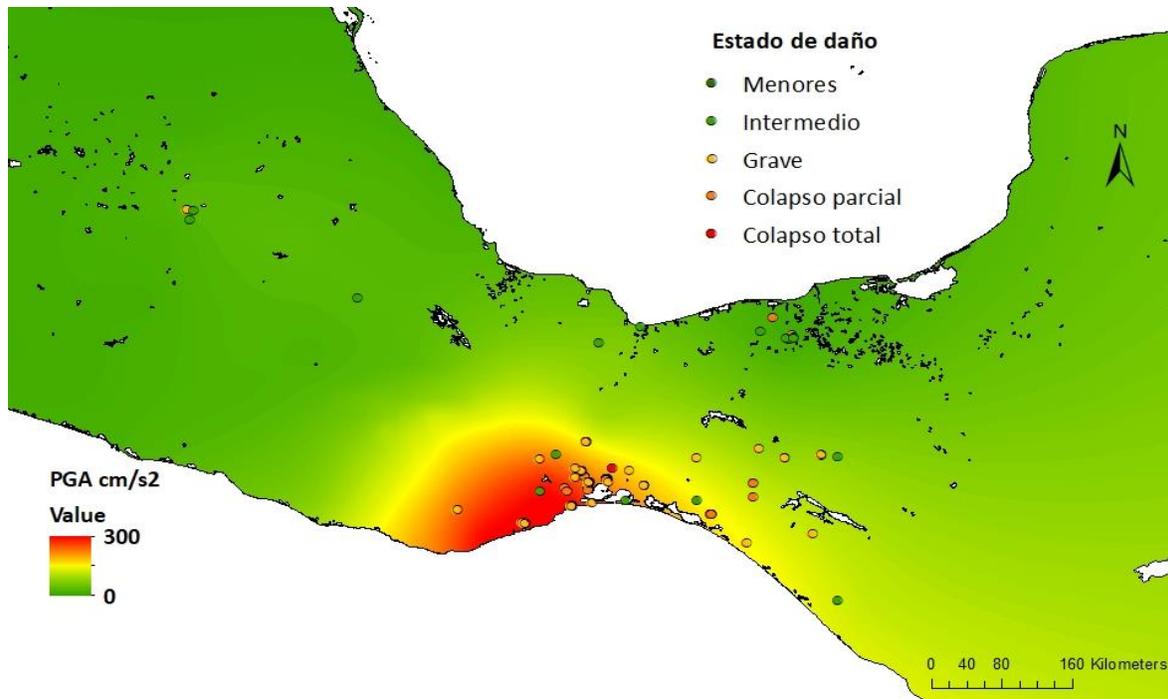


Figura 25. Mapa de la distribución de los daños recopilados para la zona de estudio.

La Figura 26 presenta un histograma que contiene el número de edificios que sufrieron algún nivel de daño según la entidad federativa. En la misma figura se observa que la entidad federativa en la cual se presentó el mayor número de los registros corresponde al estado de Oaxaca, lo que se reflejó en 41 municipios en estado de emergencia, mientras que el segundo fue a Chiapas, de los cuales 118 municipios fueron declarados en estado de emergencia. Los únicos dos estados con declaratorias de emergencia corresponden a aquellos cuya distancia epicentral es más cercana.

Mientras que los estados de Tabasco, Veracruz, Puebla, Ciudad de México registran menor cantidad de daños. Se observa que como era obvio, las entidades, en la zona de estudio, tuvieron una distribución de daños proporcional a la cercanía con el epicentro.

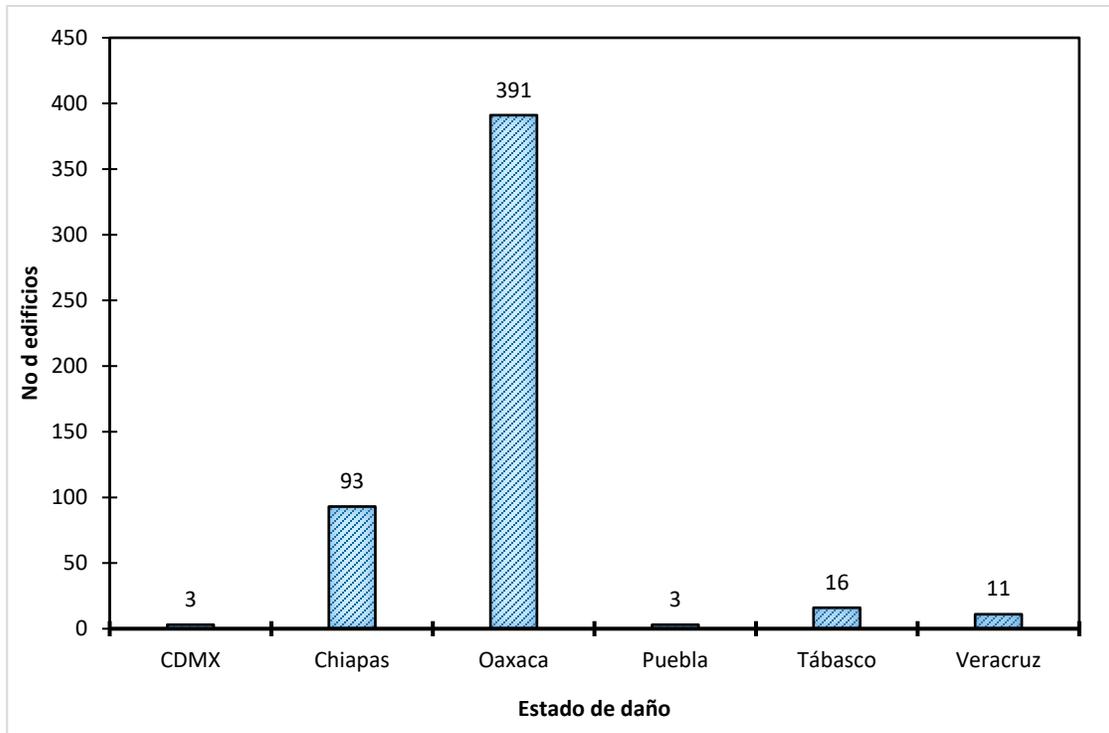


Figura 26. Distribución de daños de acuerdo con el número de inmuebles registrados por entidad federativa correspondiente a la zona de estudio.

Cabe aclarar que el número de registros de cada entidad federativa estuvo en función de la disponibilidad de información a través de los medios electrónicos empleados para la recabación de datos.

Si bien existen varias propuestas para estudiar los estados de daño, a continuación, se muestra una clasificación basada en los patrones físicos de daño observados después de la ocurrencia de este sismo.

En donde mediante el criterio del autor y lo estudiado previamente en el capítulo 1, se propuso la siguiente Tabla 15, la cual presenta cinco estados de daño.

Tabla 15. Descripción de las características correspondientes de acuerdo los daños observados en los registros.

Estado de daño	Descripción
<b>Menores</b>	Presentan daños en muros no estructurales, acabados, recubrimientos, instalaciones y vidrios que no afectan la integridad de la estructura.
<b>Intermedio</b>	Además de los daños descritos en el punto anterior, se observan grietas ligeras en elementos estructurales que evidencian daño estructural.

Estado de daño	Descripción
<b>Graves</b>	Además de los daños descritos en el punto anterior, se observan grietas mayores en elementos estructurales, así como deformaciones importantes y falla de elementos no estructurales individuales. Este daño compromete la estabilidad de la estructura.
<b>Colapso parcial</b>	Colapso parcial de una parte superior de la estructura, así como de techos y elementos estructurales.
<b>Colapso total</b>	La estructura colapsó en su totalidad; se incluye aquí el caso de colapso de la planta baja (planta baja débil).

En la Figura 27 se presenta un histograma que describe el número de estructuras según el nivel de daño que sufrieron. En el eje de las ordenadas se encuentra el número de edificios afectados representado en porcentaje respecto al número total de inmuebles afectados y la cantidad de estructuras. Hay que aclarar que el patrón de daños o estado de daño depende en gran medida del tipo de estructura del edificio (Okada y Takai, 1999).

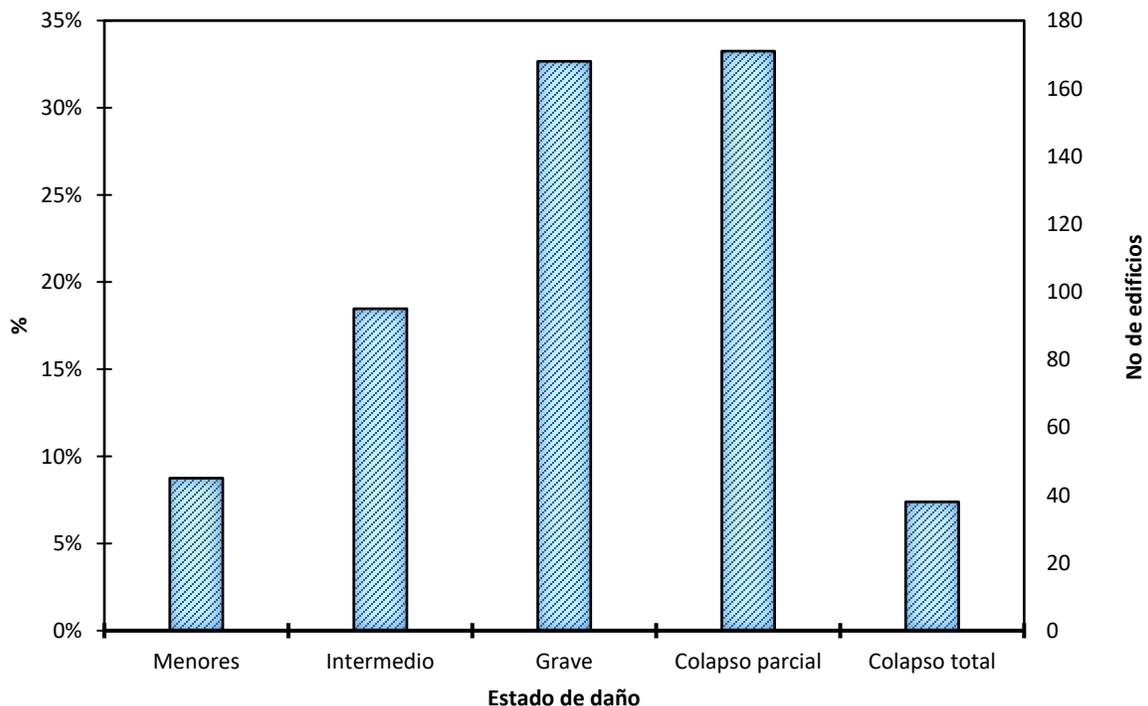


Figura 27. Distribución de los estados de daño registrados en los inmuebles de la zona de estudio.

Dado los resultados, el colapso parcial representa el 33% del total de las estructuras registradas con daños, el estado de daño seguido es de grave con el 32% de los registros totales. Las estructuras que

presentaron un nivel de daño menor son pocas en comparación con los demás estados de daño, los censos y el registro de datos recopilados fueron dados a partir de reportes por usuarios en redes sociales y reportajes de periódicos o revistas a través de medios electrónicos donde los recuentos de daños se enfocan más en graves y colapsos, mientras que los daños menores presentados no fueron reportados debido a la poca trascendencia de estos mismos.

### 3.2.1.2. Tipología estructural

La distribución de los estados de daños y la tipología estructural están íntimamente relacionados, ya que la respuesta estructural ante un sismo está dada principalmente a la resistencia de los materiales y su configuración estructural, definida por el tamaño, forma del edificio y la situación de los elementos estructurales y no estructurales.

Los tipos de estructuración identificados en los registros para esta tesis fueron clasificados, considerando principalmente las propiedades de los materiales y la tipología de sus elementos estructurales (Tabla 16).

*Tabla 16. Descripción de las características correspondientes a cada sistema estructural identificado en los inmuebles registrados.*

Abreviatura empleada	Nombre del sistema estructural	Descripción
MMNC	Muros de mampostería no confinada	Estructuras compuestas principalmente por muros de ladrillo (artesanal o industrial), principalmente adobe y en algunos casos por bloques de concreto, unidos entre sí con mortero aglutinante. Los muros no cuentan con confinamiento, es decir, carece de elementos como castillos, dalas y cadenas de concreto reforzado, así como loza maciza, diferenciándose de aquellas con cubierta ligera (teja).
MH	Mampostería histórica	Construidos con mampostería no reforzada de roca, adobe o una combinación de ellos, unidos entre sí por mortero de cal utilizado como aglutinante.
MMC	Muros de mampostería confinada	Conformada por muros a base ladrillo (artesanal o industrial) y en algunos casos por bloques de concreto unidos entre sí con mortero y confinados por castillos, dalas y cadenas de concreto reforzado.
MMSDL	Muros de mampostería sin diafragma c/cubierta ligera	Corresponde a muros generalmente de adobe o ladrillos artesanales no confinados los cuales cuentan con una cubierta ligera, esta regularmente de teja, soportadas por vigas de madera.

Abreviatura empleada	Nombre del sistema estructural	Descripción
MC	Marcos de concreto	Compuesto por columnas y vigas de concreto reforzado
EM	Estructura Mixta	Estructuras compuestas mediante la combinación entre uno o varios sistemas estructurales; ya sea columnas de acero y vigas de concreto o columnas de concreto y vigas de acero.

De forma complementaria la Figura 28 muestra algunos ejemplos de cada una de las clasificaciones descritas en la tabla anterior.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura 28. P. ej. a) Muros de mampostería no confinados (Juchitán de Zaragoza, Oaxaca), b) Mampostería histórica, Iglesia San Gregorio, Chiapa de Corzo, Chiapas. c) Muros de mampostería confinada (Salina Cruz, Oaxaca), d) Muros de mampostería sin diafragma c/cubierta ligera (San Francisco Ixhuatán, Oaxaca). e) Marcos de concreto (Plaza Ámbar, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas). f) Estructura Mixta (Mercado municipal, Juchitán de Zaragoza, Oaxaca).

Una vez clasificada la estructuración predominante en la zona de estudio, se obtuvo la distribución de estados de daño según el sistema estructural (Figura 29). Se observa que la cantidad más alta de colapsos parciales y totales se presentaron en aquellas estructuras construidas a base de muros de mampostería sin diafragma con cubierta ligera constituida por la falta de confinamiento de los muros de adobe o ladrillo con techos de tejas, hace que estas estructuras sean más vulnerables, presentado los daños observados (grave y colapsos), (Figura 28.d).

Las estructuras que presentaron en su mayoría estados de daño de intermedios a graves tienen características similares dentro de sus sistemas estructurales, ya que están constituidas por muros de mampostería confinados o semiconfinados poco dúctiles, presentando grietas diagonales en las paredes debido a la fuerza cortante (Figura 28.c). Afortunadamente el confinamiento de la mampostería ayuda a mitigar el comportamiento frágil de la mampostería ante fuerzas sísmicas, además de ayudar a mantener la estabilidad después de ocurrir el agrietamiento.

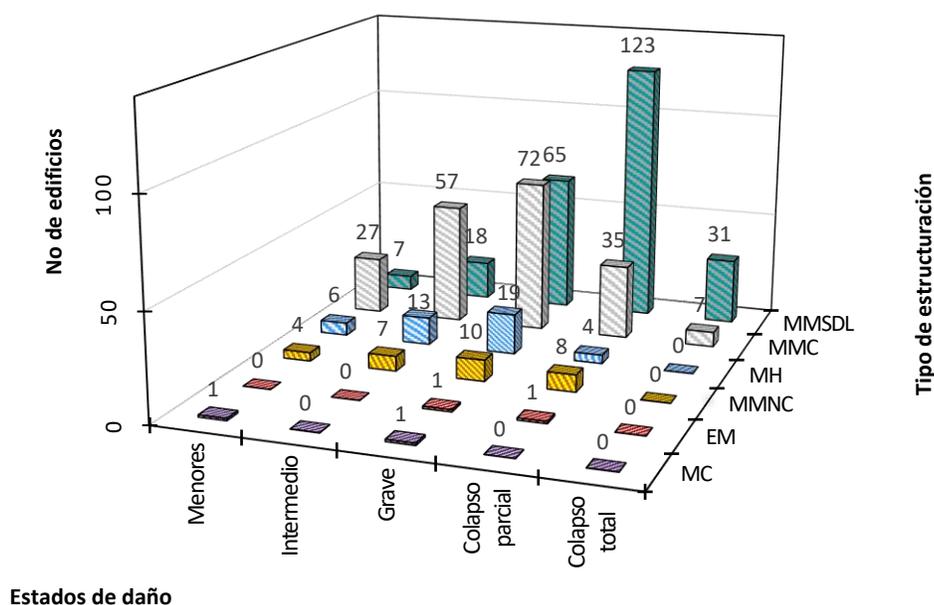


Figura 29. Distribución del tipo de estructuración de los inmuebles dañados y el estado de daño que registraron.

Para el caso de los marcos de concreto, tal es el caso de la Plaza Ámbar, ubicada en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (Figura 28.e) construida a base de este sistema estructural, presentando daños menores en su estructura; solo se observó la caída de algunos plafones y elementos no estructurales.

Para el caso de las estructuras mixtas, un ejemplo fue el mercado municipal de Juchitán, Oaxaca (Figura 28) compuesto principalmente por columnas y losas de concreto, mezclado con algunas vigas de acero; otra sección que contenía dicho inmueble contenía muros de adobe y bloques de concreto. En la primera se presentó un efecto de columna corta y en la segunda se exteriorizaron algunas grietas diagonales en algunos muros del mercado, así como el daño en recubrimientos e instalaciones.

### 3.2.1.3. Patologías estructurales

La palabra patología hace referencia al conjunto de síntomas de una enfermedad (RAE, 2019). Para referirnos desde el punto de vista estructural, la palabra tiene el mismo significado ya que las patologías enferman a las estructuras; existen patologías congénitas, es decir, cuando la estructura nace con ellas, y hay patologías que la estructura adquiere durante su vida útil. Ambas causan efectos negativos, y generalmente son difíciles de modelar y por lo tanto de predecir (Buendía y Reinoso, 2019). Las patologías estructurales identificadas en las estructuras registradas se describen continuación (Tabla 17).

*Tabla 17. Descripción de las características correspondientes a cada patología identificado en los inmuebles registrados (Buendía y Reinoso, 2019).*

Abreviatura empleada	Patología estructural	Descripción
AAF	Autoconstrucción /Ampliación/ Falta de mantenimiento	<p>La autoconstrucción representa el conjunto de procedimientos constructivos sin la supervisión de personal capacitado en el área. Cabe mencionar que no toda la autoconstrucción produce estructuras de mala calidad, sin embargo, cuando ésta se presenta en tipos estructurales poco eficientes para disipar energía sísmica, el comportamiento estructural en general será deficiente en exceso.</p> <p>Las ampliaciones sin supervisión de algunas estructuras generalmente conducen a un comportamiento sísmico deficiente.</p> <p>La falta de mantenimiento, aunque en menor medida, también provoca efectos; P. ej. corrosión en acero de vigas o columnas, grietas y desmoronamiento de muros, que reducen la calidad de la edificación.</p>
Efec esq	Efecto de esquina	<p>La configuración estructural del edificio hace que dos de sus caras contiguas (la colindante con otras estructuras) sea mucho más rígida que la otra (fachadas). Esto provoca que, ante una demanda sísmica, el edificio, además de las demandas de desplazamientos, sufra demandas de torsión importantes.</p>
Golp	Golpeteo	<p>Se presenta cuando la separación entre edificios es no es lo suficientemente grande, provocando que, durante un sismo, los edificios choquen entre ellos y se dañen mutuamente</p>
PBD	Planta baja débil	<p>Generada por la ausencia de muros en la planta baja de una edificación, en relación con los pisos superiores. Esto provoca que la demanda de desplazamientos se concentre solo en la planta baja, dañándola en exceso.</p>

Abreviatura empleada	Patología estructural	Descripción
ECC	Efecto de columna corta	Presente en estructuras donde las columnas con muros de relleno ligados a ellas no se encuentran rellenas en su totalidad, y el espacio entre columnas hacen que la distancia libre de las columnas sea más corta. Esto provoca que los esfuerzos de cortante se concentren en su totalidad en la parte libre de la columna, dañándola en exceso.
Pres apén	Presencia de apéndices	La estructura presenta elementos tales como cuartos de servicio o anuncios espectaculares que no están ligados a la estructura. Estos elementos generalmente al no estar ligados a la estructura principal, y a que sufren demandas de aceleración de entrepiso generalmente máximas, resultan dañadas en los movimientos sísmicos.
Hund	Hundimientos	Se manifiesta por el asentamiento de la superficie del terreno en una determinada área que puede estar en función de las características y el entorno del suelo.
Daños p	Daños previos	La estructura se observa dañada por sismos previos o dañada debido a la falta de mantenimiento.
Ubicación en cuña		Estructuras que su localización espacial en una cuadra hace que su planta tenga formas triangulares o trapezoidales.
Irregularidad vertical	Irregularidad vertical	Se presenta cuando existe un cambio abrupto en la geometría de los diferentes entrepisos que componen una edificación, provocando la distribución irregular de pesos en cada entrepiso.

La Figura 30 muestra la distribución de daños de acuerdo con las patologías presentes, en donde la patología que agrupa autoconstrucción, ampliaciones y falta de mantenimiento es predominante en los estados de daño considerados en esta tesis, la mayor cantidad fue representada por colapsos parciales el cual cuenta con el mayor número de registros en general de acuerdo con la información recabada (Figura 27). Es importante asentar que este tipo de patologías puede representar una mayor vulnerabilidad en las estructuras, debido a que la autoconstrucción no garantiza seguridad ya que, la elección del tipo estructural, los materiales y los procesos constructivos no cumplen con especificaciones mínimas de las normas de diseño sismo-resistente. Empero, hay que reconocer que cuando se elige un tipo estructural adecuado, los procesos constructivos pueden desembocar en estructuras que si bien pueden estar sobre diseñadas (con sobre costos en el desperdicio de materiales), éstas presentan un bien nivel de seguridad sísmica, lamentablemente este no fue el caso de las estructuras estudiadas que resultaron más dañadas. En el caso de las zonas más dañadas se observó que los tipos estructurales deficientes aunado a las diferentes patologías tales como la autoconstrucción, ampliaciones y falta de mantenimiento generaron los mayores daños. Es necesario aclarar que la selección del tipo estructural en esta zona no está solamente asociada a la

presencia de la autoconstrucción, sino a problemas sociales y económicos que quedan fuera del alcance de esta tesis.

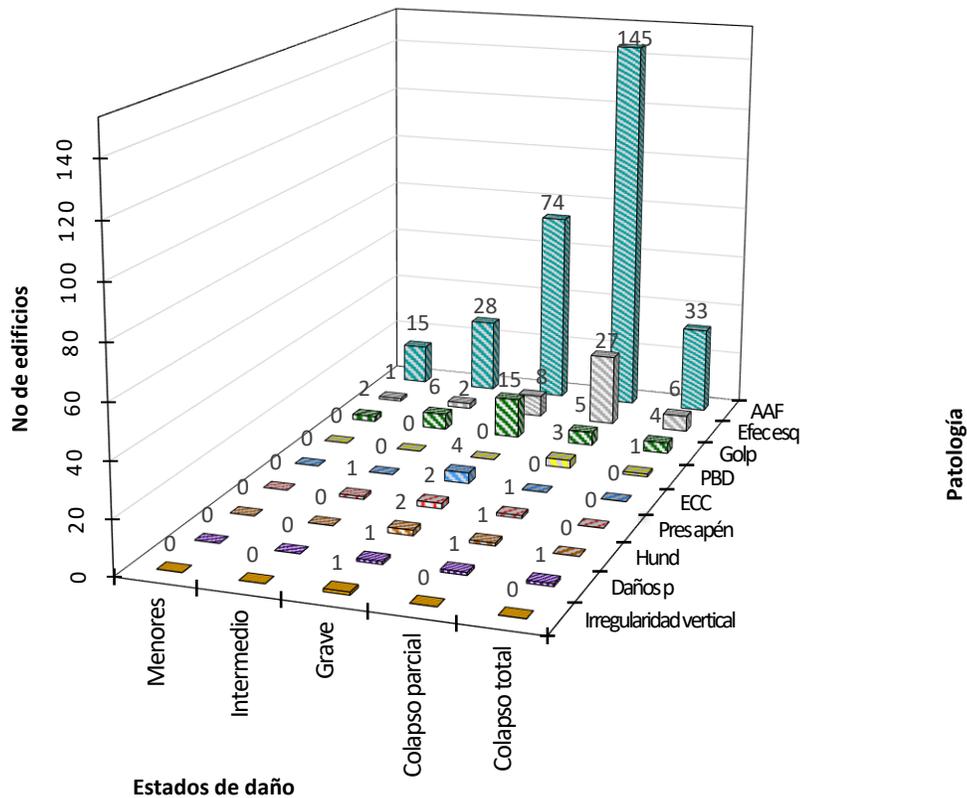


Figura 30. Distribución total de las estructuras de acuerdo con las patologías presentes y el estado de daño

Otras patologías presentes en los inmuebles severamente dañados corresponden al efecto de esquina, donde los muros colindantes, más rígidos que las fachadas provocaron más esfuerzos torsionantes (Figura 31.a). El golpeteo se muestra en la Figura 31.b, donde la nula separación entre edificios colindantes y cuyas alturas no son iguales, provocan que ambas estructuras choquen entre sí y se dañan mutuamente.

Dados los resultados se observaron otras patologías presentes en los registros, aunque en menor medida. En la Figura 31.c se observan algunas columnas de concreto reforzado y sobre todo la ausencia de muros, respecto al piso superior inmediato, dichas características corresponden a la planta baja débil. El efecto de columna corta fue observado en la escuela primaria Leona Vicario (Figura 31.d) y se presentó debido al el espacio que ocupan los ventanales de cada salón de clases, provocando la concentración de fuerzas sísmicas en estos espacios libres. La presencia de apéndices también puede provocar daños en un edificio, ya que estos presentan aceleraciones considerables, y generalmente no son diseñados sísmicamente (Figura 31.e). El hundimiento se identificó en una escuela primaria localizada en el municipio Centro de Tabasco, (Figura 31.f.) la cual corresponde a una zona identificada como susceptible a presentar el fenómeno de licuación. La vivienda de la

Figura 31.g según testimonios ya había sido afectada previamente por el sismo del 7 de julio de 2014 con una magnitud de  $M_w$  6.9, sin embargo, debido a la magnitud del sismo del 7 de septiembre de 2017 el inmueble quedó parcialmente colapsado.

La Figura 31.h es un ejemplo de irregularidad vertical, ya que, como se observa, existe un cambio drástico en la geometría del edificio, lo cual hace que se concentren esfuerzos en los elementos estructurales donde se presentan los cambios geométricos en altura.



a)



b)



c)



d)



e)



f)



**g)**



**h)**

Figura 31. P. ej; a) Efecto de esquina, (Comercio ubicado en Juchitán, Oaxaca). b) Golpeteo, (Vivienda, Juchitán, Oaxaca). c) Planta baja débil, (Vivienda, Minatitlán, Veracruz). d) Efecto de columna corta (Escuela Primaria Leona Vicario, Salina Cruz, Oaxaca). e) Presencia de apéndices, (Farmacias del ahorro, Salina Cruz, Oaxaca). f) Hundimiento, (Escuela Primaria Ignacio López Rayón, Tabasco). g) Daños previos (Vivienda, Unión Juárez, Chiapas). h) Irregularidad vertical (Junta Distrital 07, Ciudad Ixtepec, Oaxaca).

Como se observó en la Figura 29, el grupo de estructuras más afectada en la zona de estudio corresponde a muros de mampostería sin diafragma con cubierta ligera. Este tipo estructural además de ser el más vulnerable por su estructuración, se observó que muchas de esas edificaciones además padecían de alguna patología. En la Figura 32 se presenta la distribución de las estructuras dañadas construidas a base de mampostería sin diafragma con cubierta ligera que tenían alguna patología.

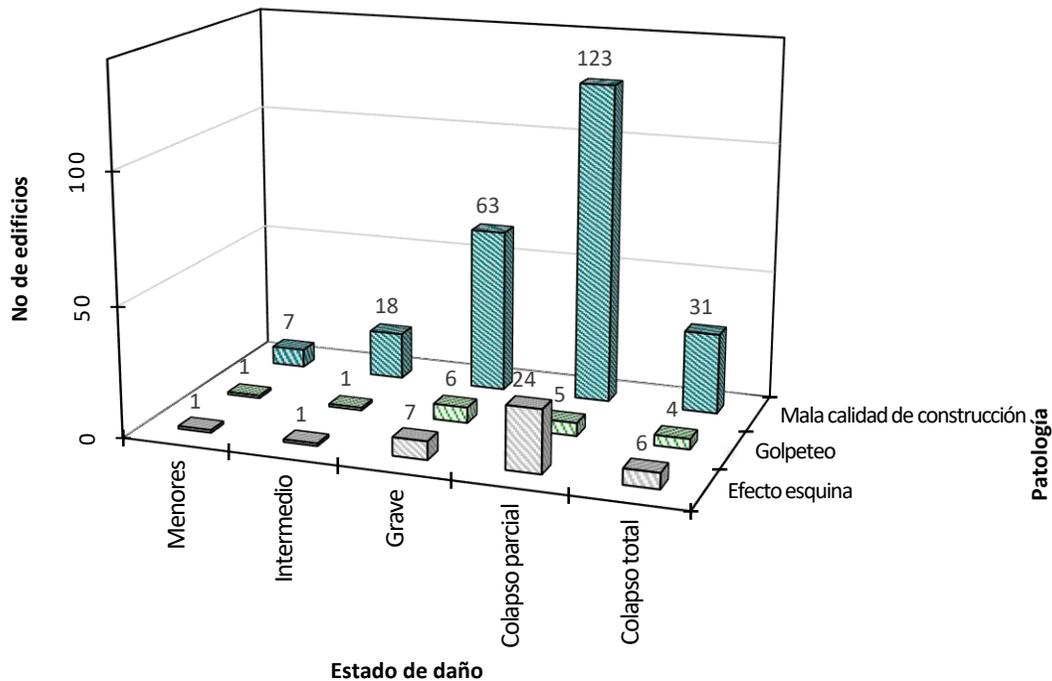


Figura 32. Distribución de las estructuras correspondientes a muros de mampostería sin diafragma c/cubierta ligera de acuerdo con las patologías presentes y el estado de daño.

El gráfico (Figura 32) reafirma que la patología más perjudicial corresponde a la mala calidad de construcción, la cual genera un comportamiento deficiente debido a varios factores tales como el material utilizado, principalmente adobe o ladrillo no confinado y, por tanto, nada apropiado para una construcción antisísmica, que de acuerdo con la ubicación geográfica de estas estructuras, se encuentran expuestas a una alta actividad sísmica, como ya fue mencionada en los capítulos anteriores. La construcción de manera modular es otro factor influyente en el comportamiento deficiente de las estructuras; este tipo de construcción avanza según las necesidades y posibilidades financieras de las personas involucradas, enfrentando un proceso lento en la construcción y, por tanto, modificando o ampliando los inmuebles sin asesoría técnica o conocimiento de los posibles efectos, ocasionando que los estados de daño aumenten desarrollándose diversas patologías. Lo anterior trae como consecuencia, además, altos costos en el desarrollo de la construcción, debido a la falta de planeación en cómo serán las estructuras.

Aunado a lo anterior, es necesario comentar que México tiene un déficit de infraestructura básica, la zona de estudio comprende entidades del país que padecen carencias por acceso a servicios básicos en la vivienda. En la Figura 33 se observa que Oaxaca y Chiapas, tuvieron menos asequibilidad de viviendas, clasificadas entre el 20% y 40%, es decir, estos estados no cuentan con accesibilidad a una vivienda básica, lo anterior corresponde a los registros obtenidos en esta tesis, donde la mala calidad de construcción predomina como la principal patología debido a que la población construye su vivienda por procesos de autoproducción debido a su poca asequibilidad.

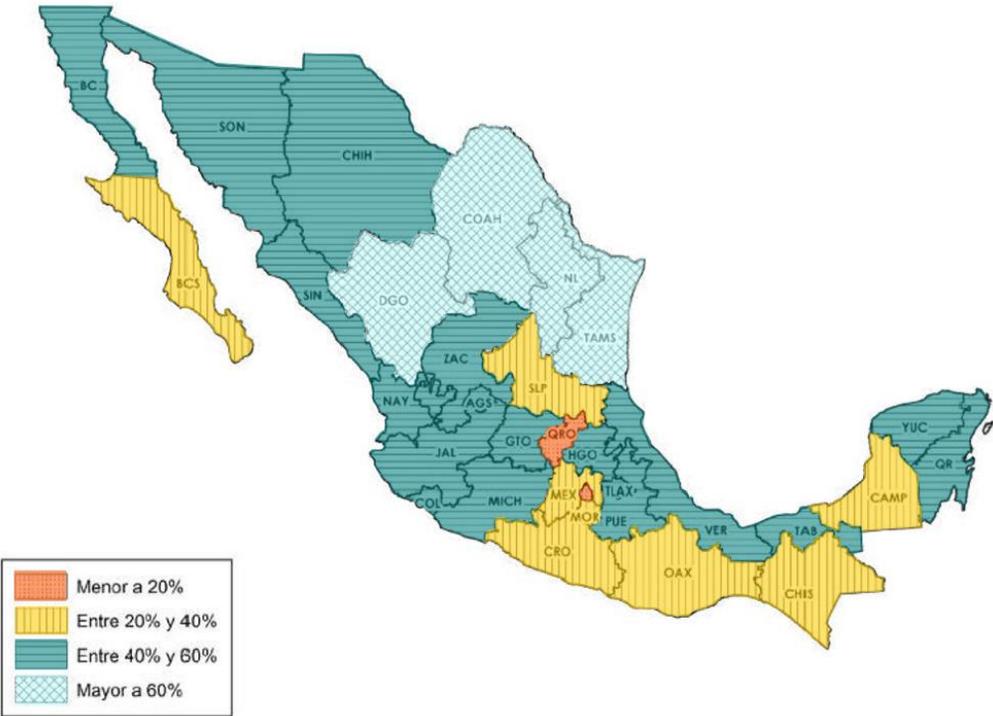


Figura 33. Mapa de la República Mexicana que refleja la asequibilidad de vivienda por entidad federativa en 2018 (Elaborado por Sociedad Hipotecaria de la Federación con información de INEGI).

En la Figura 34 para el tipo estructural muros de mampostería confinada, a pesar del aumento de las patologías presentes en las estructuras dañadas, el número de colapsos parciales o daños graves fue mínimo, ya que, el confinamiento ayuda a ligar los muros entre sí, distribuyendo las fuerzas laterales inducidas por sismo. Se observó un comportamiento de columna corta en algunas viviendas, presentando paredes de mampostería confinadas que cubrían parcialmente un marco.

La Figura 35 muestra un caso en particular de los daños derivados por una mala calidad de construcción en donde se observó un efecto de columna corta (subrayadas en un círculo rojo), en las zonas donde los muros de mampostería cubrían parcialmente un marco; también se observó en los espacios de distancia libre no ligados a los muros correspondían a la ubicación de ventanas (planta baja y segundo piso) y las puertas de acceso a la planta baja del edificio. El edificio corresponde a un uso habitacional; se observó, que de acuerdo con la distribución y construcción de los pisos superiores estos fueron ampliados después, lo cual conlleva modificaciones en la estructuración del edificio. Por otro lado, se identificaron inconsistencias en el sistema estructural en una columna (encerrada en un recuadro amarillo) en donde la columna no muestra continuidad con respecto a la planta baja debido a que esta columna sobre sale completamente del edificio. Por último, se identificó la falta de mantenimiento en esta estructura que también puede perjudicar, aunque de menor medida el comportamiento estructural del edificio.

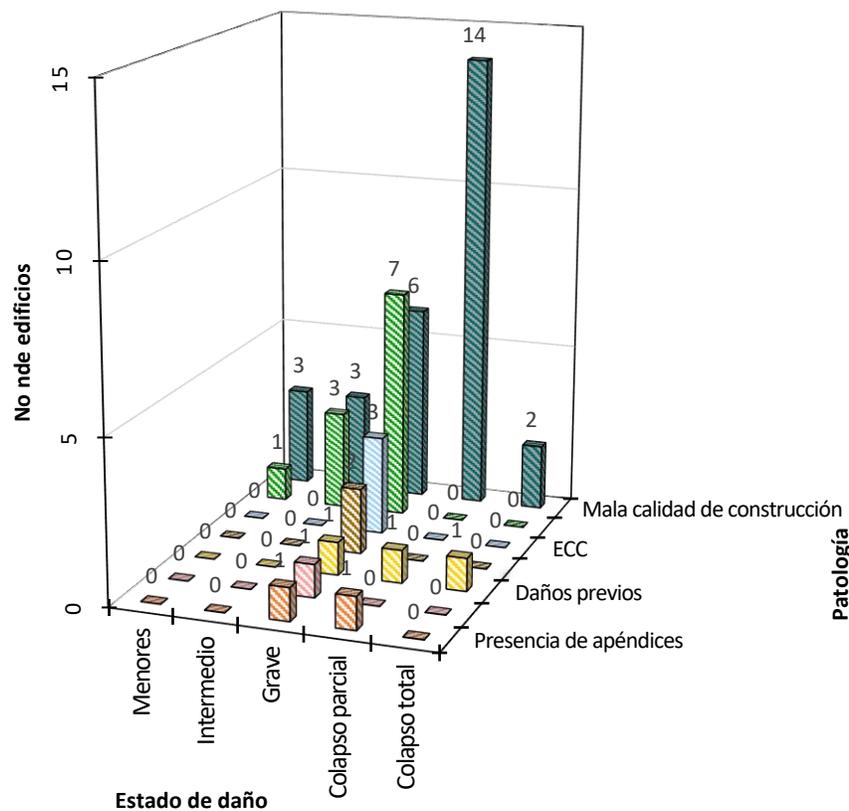


Figura 34. Distribución de las estructuras correspondientes a muros de mampostería confinada con las patologías presentes y el estado de daño.



Figura 35. P. ej. Departamentos ubicados en Roque Robles, S/N entre Belisario Domínguez y Ignacio Zaragoza, 6 TA, Juchitán de Zaragoza, Oaxaca.

La mala construcción presente en las estructuras clasificadas en la tipología estructural de muros de mampostería sin diafragma c/cubierta ligera se resumen en la combinación de materiales para la construcción, es decir, en algunos casos se observó que los muros tenían ladrillos recocidos, bloques de concreto y muros de adobe, por lo que no existía una uniformidad de los materiales. También se observó que la colocación del tejamanil (tabla delgada cortada en listones que se colocan como tejas en los techos generalmente inclinados de las casas) sólo se hacía alrededor de un elemento barra en este caso polín de madera sin algún tipo de confinamiento, haciendo más vulnerable este último ante fuerzas sísmicas. También la falta de ligaduras entre muros provocó fallas fuera del plano y en los casos en que los muros no fallaron, los desplazamientos fuera del plano provocaron que las vigas de soporte de los sistemas de techo, al estar simplemente apoyadas, perdieran soporte, cayendo hacia el interior de las viviendas.

#### 3.2.1.4. Uso de los edificios registrados

Los diferentes usos se clasificaron en los siguientes grupos, comercios, escuelas, iglesias, oficinas, sector salud, viviendas y otros. La clasificación con mayor número de edificios con daños graves, colapsos parciales y totales corresponde al grupo de viviendas, las cuales, además representan al mayor uso de inmuebles clasificados. Mientras que, para estados de daño menores e intermedios,

el sector salud solo experimento daños leves. En tanto, iglesias sufrieron daños graves, seguido de escuelas y comercios, con una gran cantidad además de colapsos parciales.

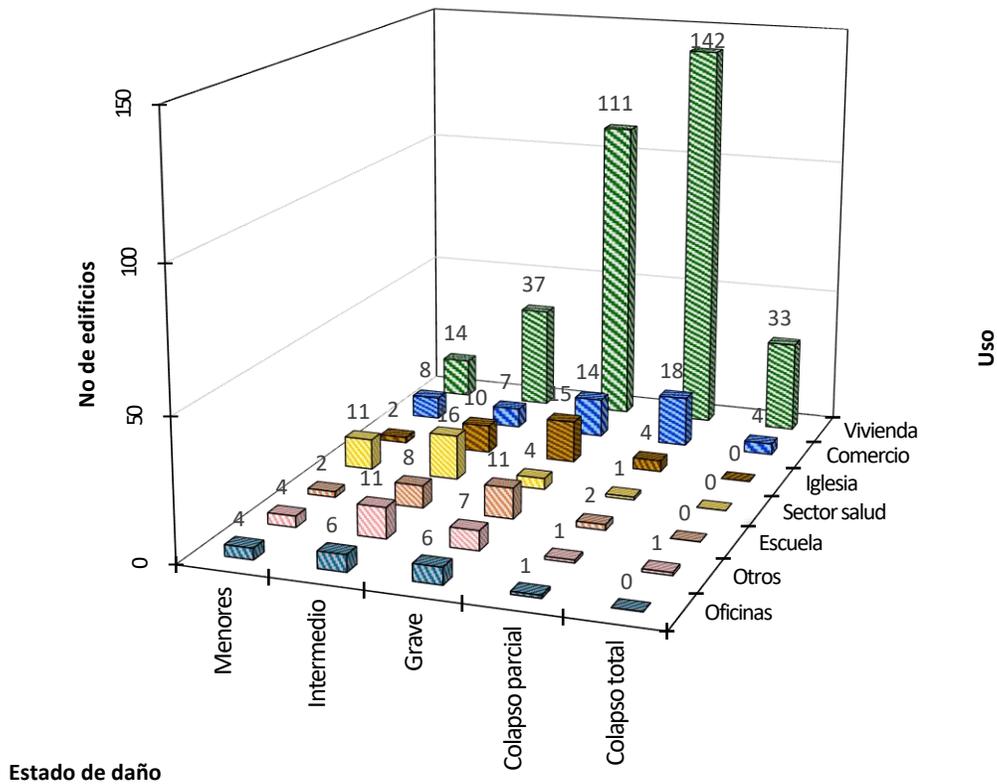


Figura 36. Distribución del uso de los inmuebles y estados de daño.

A continuación, se presenta un ejemplo de cada una de las clasificaciones del uso de inmuebles (Figura 37) que se recabaron respecto a la zona de estudio.



a)



b)



c)



d)



e)



f)



g)

Figura 37. Ejemplo de los usos de cada inmueble presentes en las estructuras dañada, donde; a) Vivienda ubicada en Juchitán, Oaxaca., b) Comercio, Unión Hidalgo, Oaxaca., c) Iglesia., d) Hospital., e) Centro Escolar Juchitán, Juchitán, Oaxaca., f) Otros; Cementerio, San Mateo del Mar, Oaxaca., g) Oficinas; Palacio Municipal de Juchitán, Oaxaca.

### 3.2.1.5. Niveles de los edificios registrados

La Figura 38 presenta la distribución de la altura respecto al estado de daños, en ella se observan tres alturas consideradas, baja, mediana y gran altura, en la primera se agruparon estructuras de 1 a 3 pisos, la segunda de 4 a 7 pisos y la última a los edificios mayores a 7 pisos. Cabe señalar en este apartado que los edificios de baja altura corresponden al mayor número de registros recabados. Esto puede relacionarse con el principal uso de las estructuras, que como se habló anteriormente (Figura 37) corresponde a viviendas, por lo que el número de pisos de las viviendas son en su mayoría de baja altura. Al contrario de esto, hubo muy pocos registros de edificios de gran altura, esto puede entenderse a partir de su trascendencia, es decir, a diferencia de las viviendas, los edificios de gran altura cuentan con un diseño sismo-resistente y por tanto los daños no fueron documentados.

Finalmente, como se observó en el capítulo dos Figura 24 los espectros de respuesta indican que las estructuras con periodos de vibrar cortos, entre rangos de 0.1 s a 0.5 s presentaron grandes aceleraciones, es decir, estructuras de baja altura fueron expuestas a grandes intensidades. Lo cual además explica que los estados de daños con mayor número de registros corresponden a graves y colapsos.

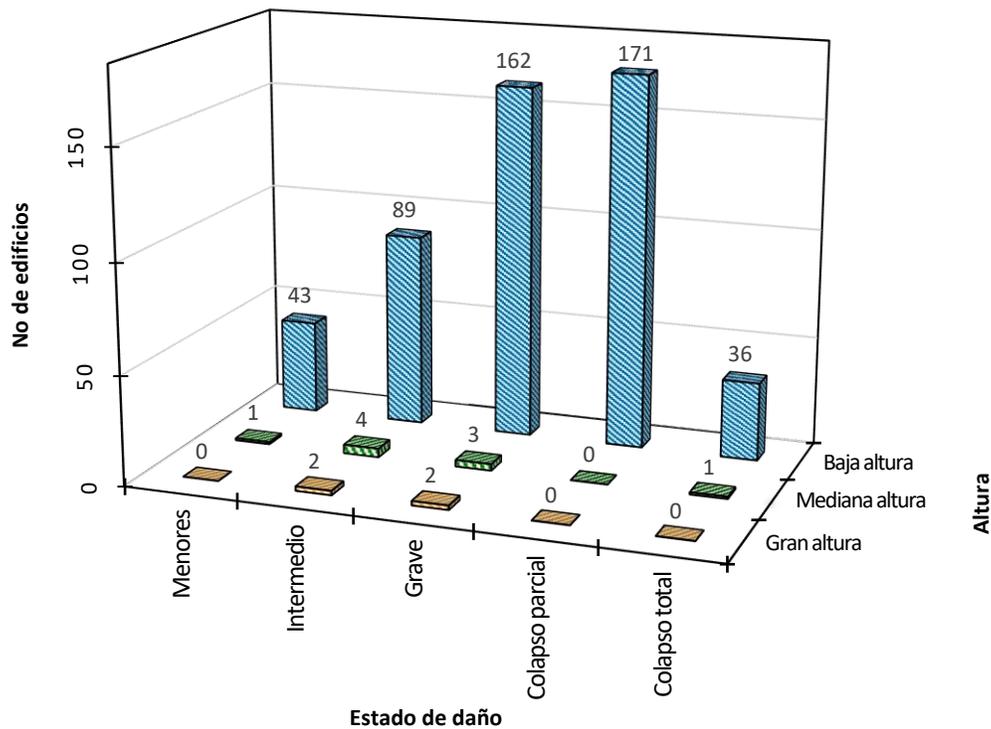


Figura 38. Distribución de la altura de los inmuebles registrados y el estado de daño.

Dados los resultados y de acuerdo con los daños observados a través de la recopilación de inmuebles, la falla de las paredes fuera del plano en viviendas con muros de mampostería sin diafragma con cubierta ligera fue el patrón de daño más observado. La ausencia de elementos estructurales que confinan las paredes contribuye significativamente a este tipo de falla, produciendo en la mayoría de los casos colapso parcial o total, como se reflejó en la distribución de daños (Figura 27). En estructuras con muros de mampostería confinada o no confinada se observaron grietas diagonales en paredes, debido a la fuerza cortante produciendo daños graves.

Las deficiencias estructurales pueden resumirse como una escasez de confinamiento en paredes estructurales, mal refuerzo de acero (longitudinal y transversal), y detalles deficientes. En tanto, las patologías como la mala calidad de construcción, resultó ser la más perjudicial en los daños

derivados por el sismo y se vio reflejada en estructuraciones deficientes, produciendo colapso parcial de las paredes.

Los daños observados en edificios históricos y antiguos probablemente se debieron al contenido de alta frecuencia del movimiento del suelo y su componente vertical debido a la proximidad del epicentro, causando daños a campanarios, cúpulas, torres, muros y bóvedas (Pozos, A., Chávez, M., Jaimés, M. y Guerrero, 2019).

### 3.2.2. Puentes y caminos

Dentro de los daños observados se registraron varios caminos, carreteras, autopistas y puentes que sufrieron daños, sin embargo, no se agruparon en las estadísticas presentadas anteriormente, debido a que los parámetros empleados para la clasificación de estados de daño y estructuración son diferentes a los expuestos anteriormente, a continuación, se presentarán las estadísticas de los daños en cuestión.

#### 3.2.2.1. Distribución de los daños por entidad federativa

En la Figura 39 se representa el número de registros de puentes y caminos por entidad federativa correspondiente a la zona de estudio. En donde se observa que Oaxaca es el estado más perjudicado de la zona de estudio. En estados como Puebla y Ciudad de México, no se registraron daños, como se analizó anteriormente estos estados en general no sufrieron mayores afectaciones.

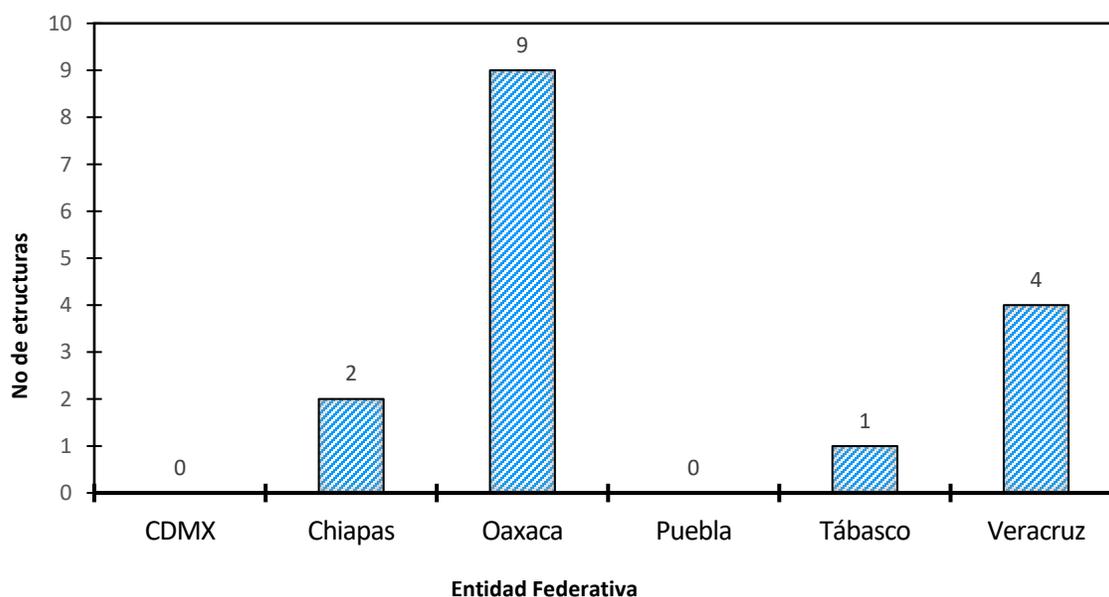


Figura 39. Distribución de daños de acuerdo con el número de puentes y caminos registrados por entidad federativa correspondiente a la zona de estudio.

Los estados de daño están en función del sistema estructural que conforma a la estructura estudiada, de acuerdo con lo publicado (CALTRAS, 2012) las descripciones del estado de daño se definen teniendo en cuenta el daño de los otros componentes, a continuación se presentan las características para cada estado de daño (Tabla 18).

Tabla 18. Descripción de estados de daño de acuerdo con (HAZUS-MH, 2011)

Estado de daño	Descripción
<b>Ligero/menor</b>	Pequeños desprendimientos en columnas; grietas menores en la cubierta; grietas y desprendimientos menores en el pilar. El daño sólo requiere una reparación estética.
<b>Moderado</b>	Grietas moderadas y desprendimientos de las columnas, pero sin degradación estructural relevante, desplazamientos moderados (< 50 mm) del pilar, asentamiento moderado de la losa y deformación de pernos ubicados en las conexiones.
<b>Grave</b>	Degradación de los componentes estructurales importantes sin colapso y/o desplazamiento importante en las conexiones.
<b>Completo</b>	Falla de los componentes estructurales importantes que conducen al colapso, pérdida de apoyo, y/o inclinación de la subestructura debido a la falla de la cimentación.

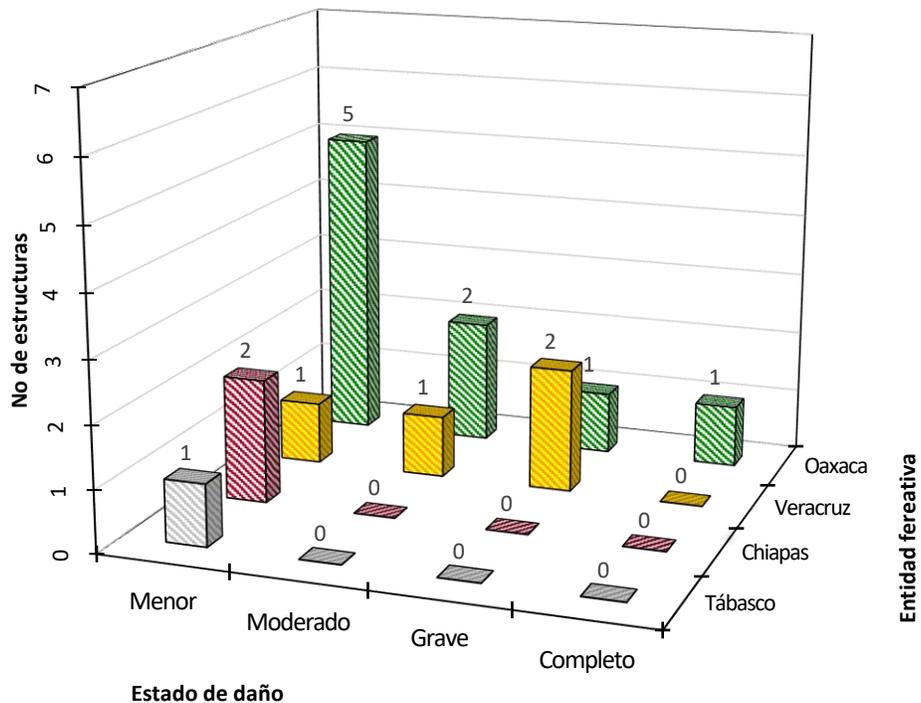


Figura 40. Distribución de los estados de daño en cada entidad federativa de la zona de estudio para puentes y caminos registrados.

Los estados de daño que se observaron en los puentes y caminos registrados de acuerdo con la entidad federativa se muestran en la Figura 40, donde Oaxaca representa el estado con mayor número de registros, así como de estructuras clasificadas en este apartado con daños menores.

Debido a la importancia de estas estructuras el reporte de los daños a través de los medios electrónicos si contemplo la clasificación de daño menor y al analizar las estructuras solo eran agrietamientos que no comprometían el comportamiento estructural.

### 3.2.2.2. Tipología estructural

Para determinar el tipo estructural de las estructuras estudiadas en este apartado, se clasificaron en dos grupos, el primero corresponde a caminos y el segundo a puentes. La Figura 41 muestra la distribución del tipo de estructuración y los estados de daño presentes en los caminos registrados. Aquellos caminos clasificados de terracería presentaron el mayor número de daños menores, presentando solo grietas en los caminos debido a que no cuentan con un tipo de estructuración que ayude a regular su comportamiento. Por otro lado, el camino que presentó daños graves corresponde al camino del malecón de Minatitlán, Veracruz; que presentó un desprendimiento de parcial de la cuneta, debido al anclaje deficiente entre elementos estructurales, específicamente

entre elementos viejos y nuevos. Dejando expuesto la falta de mantenimiento, ya que existe una grave corrosión los elementos barra que constituyen la estructuración.

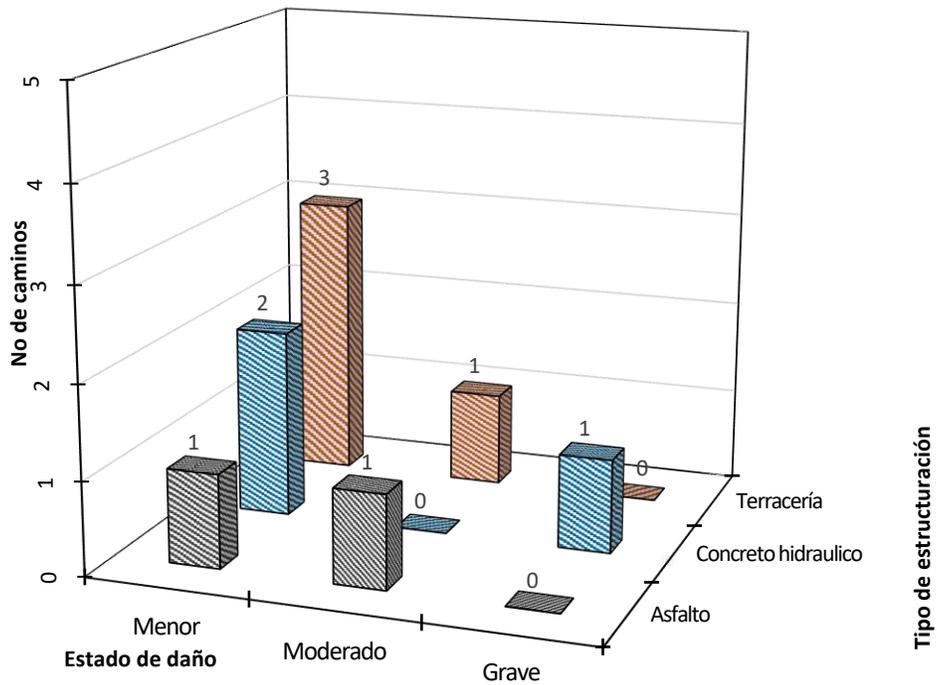


Figura 41. Distribución del tipo de estructuración de los caminos dañados y el estado de daño que registraron.

Por otro lado, la estructuración mediante asfalto solo presentó daños menores y moderados, los cuales dependieron principalmente de la profundidad y alcance de las grietas, ya que este agrietamiento no provocó mayor trascendencia en el comportamiento de los caminos.

A continuación, se muestran ejemplos del tipo de estructuración, la Figura 42.a representa daños en terracería, la Figura 42.b daños en asfalto y la Figura 42.c daños en concreto hidráulico.



a)



b)



c)

Figura 42. Ejemplo de los daños registrados en caminos con los siguientes tipos de estructuración; a) Terracería, camino de Minatitlán, Veracruz., b) Asfalto, Santa María Xadani, Oaxaca., c) Concreto hidráulico, en Túnel Sumergido de Coatzacoalcos, Veracruz.

La tipología estructural de los puentes se agrupó en estructuras de tipo concreto reforzado; la distribución de estados de daño presentes en puentes se observa en la Figura 43, donde el estado de daño con mayor número de registros corresponde a los daños menores, seguido de aquellos que presentaron algún tipo de degradación excesiva sin llegar al colapso, desplazamiento residual significativo en las conexiones o un mayor asentamiento en los apoyos, clasificado con daño grave, y finalmente un colapso y un puente con daño moderado.

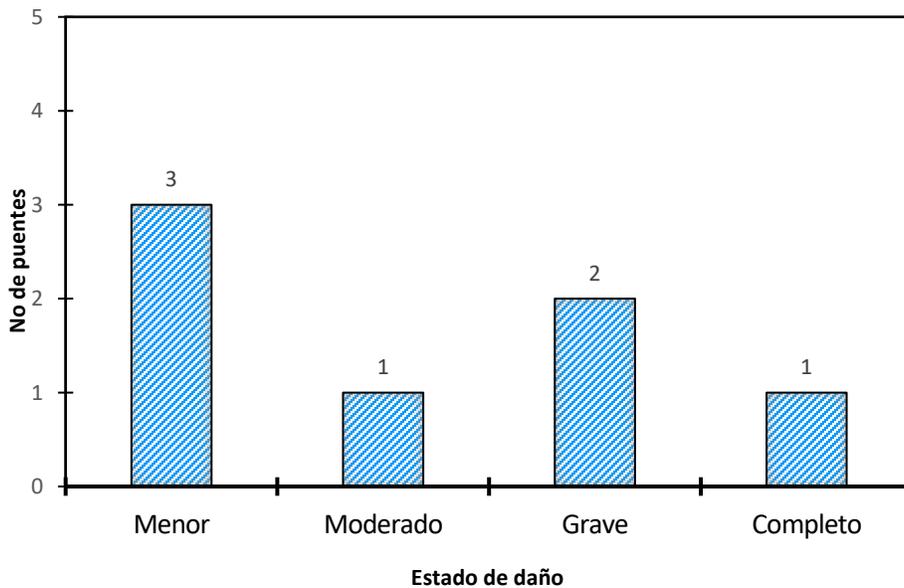


Figura 43. Distribución del estado de daño en los puentes registrados.

En las siguientes imágenes se ejemplifican el estado de daño de un par de puentes, en la Figura 44.a se muestra el puente “La Cintal” localizado en la carretera Ocozocoautla, en donde se presentan pequeñas grietas y el ligero desprendimiento en elementos de unión entre el puente y la carretera, en la Figura 44.b se observa el puente “La Ventosa”, ubicado en la intersección de la carretera Salina Cruz-La Ventosa y la carretera Transísmica, sufriendo daños graves debido a la rotación de la cubierta, provocando la separación del estribo y la cubierta.



Figura 44. Puentes que sufrieron un tipo de daño; a) Puente “La Cintel”, Carretera Ocozocoautla – Cintalapa, Chiapas., b) Puente “La Ventosa” ubicado carretera Salina Cruz-La Ventosa, Oaxaca.

Las afectaciones a la infraestructura vial resultaron mínimas en comparación con los daños presentados en los edificios, sin embargo, es importante conocer las afectaciones presentadas para así mejorar, complementar y crear normas que garanticen la seguridad de la infraestructura.

En la Figura 45 se ubican los puentes con daños presentados anteriormente, la escala de estado de daño va de menores a completos, la mayoría de ellos se localizan en el estado de Oaxaca con una distancia de 250 kilómetros del epicentro, aproximadamente.

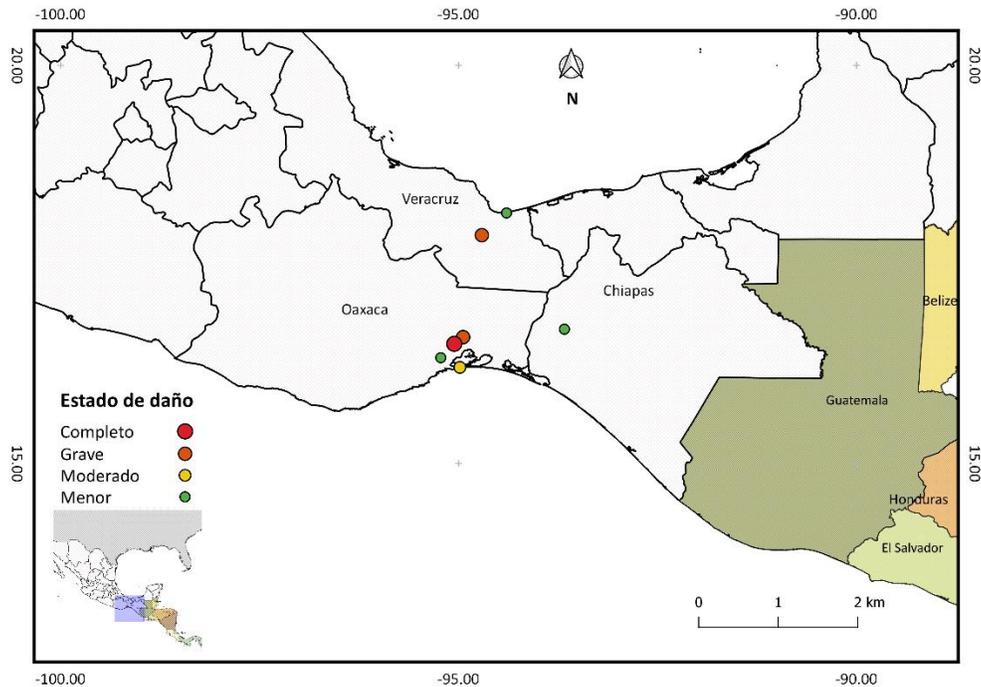


Figura 45. Distribución de los daños en puentes a partir de la recabación de información de la base de datos.

### 3.3. Licuación

Como se mencionó en el primer capítulo, la licuación es un fenómeno derivado de la ocurrencia de un sismo al incidir las ondas sísmicas en la base de materiales granulares sueltos y saturados. La susceptibilidad a licuación de un material granular evalúa los siguientes factores:

- 1) Históricos, tales como la recurrencia de este fenómeno en el mismo lugar.
- 2) Geología en donde influye el proceso de sedimentación, la edad del depósito y el nivel de aguas freáticas.
- 3) Composición del suelo la uniformidad del tamaño de arenas y gravas son considerados de alta susceptibilidad ante la recurrencia de este fenómeno, debido a lo poca fricción entre partículas.

Una gran cantidad de los casos de licuación de arenas se han presentado en o cerca de las costas de México, en parte, las zonas de alta sismicidad. Hay ejemplos de casos bien documentados del fenómeno dentro de la zona de estudio de esta tesis como de Coatzacoalcos, Veracruz (Marsal, 1961), Chiapa de Corzo, Chiapas (Dawson A., 1977) y San Pedro Pochutla y Santa María Tonameca, Oaxaca (Figueroa J., 1975).

Conforme a la observación de los daños registrados en la base de datos y las características que estos presentaban, se encontraron los siguientes casos de licuación (*Tabla 19*).

*Tabla 19. Lugares identificados en los registros de la base de datos con características de licuación.*

Edificio	Latitud ° N	Longitud ° O	Municipio	Entidad	Observación
Cementerio municipal	16.321481	95.097189	San Mateo del Mar	Oaxaca	Hundimiento de tumbas
Puente-Camino	16.208004	94.982596	San Mateo del Mar	Oaxaca	Agrietamiento de 10 cm en el camino
Carretera Acachapan y Colmena	18.047973	92.81182	Centro	Tabasco	Asentamientos y desplazamientos que dieron lugar a aberturas sobre el pavimento de 30 centímetros aproximadamente
Ranchería Acachapan y Colmena	18.047343	92.776335	Centro	Tabasco	Agrietamiento en el camino
Vivienda	18.132155	94.49284	Coatzacoalcos	Veracruz	Hundimiento de más de un metro

#### 3.3.1. San Mateo del Mar, Oaxaca

San Mateo del Mar es un municipio del estado de Oaxaca, habitada principalmente por indígenas huaves, ubicada en el istmo de Tehuantepec entre la laguna inferior del Golfo de Tehuantepec. Su geología corresponde principalmente a depósitos del cuaternario conformados principalmente por formaciones aluviales y litorales, de arenas y material orgánico (INEGI, 2005).

### 3.3.1.1. Evidencia de licuación

Después de la ocurrencia del sismo del 7 de septiembre de 2017, las familias pertenecientes a las localidades de Barrio Nuevo y la cabecera municipal de San Mateo del Mar observaban que además de los daños estructurales ocurrirán otros fenómenos como la hendidura del terreno, el agrietamiento de caminos con grietas de entre 15 y 20 cm de ancho y grandes profundidades. En algunos casos “el agua caliente brotaba de las grietas y la arena”, según testimonio de Antonieta Bravo, pobladora de San Mateo del Mar. Otra observación particular de los daños presentados es el hundimiento paulatino de las viviendas, así como del cementerio en donde las lapidas están parcial o completamente hundidas. Esto ocurre por la pérdida de resistencia del suelo las cuales provocan asentamientos en las estructuras.

### 3.3.2. Centro, Tabasco

El municipio de Centro es uno de los municipios que conforma el estado de Tabasco compuesto principalmente de suelo aluvial, litoral y lacustre del periodo cuaternario, localizado en la región del río Grijalva (INEGI, 2006).

#### 3.3.2.1. Evidencia de licuación

De acuerdo con (E. Jiménez, 2017) la carretera Acachapan y Colmena a la altura del kilómetro 18+000 se registraron asentamientos y desplazamientos laterales que dieron lugar a aberturas sobre el pavimento de 30 centímetros aproximadamente. En la misma zona también se presentaron afectaciones en los patios de las viviendas ya que de acuerdo con los testimonios; “la tierra se abrió, las paredes y pisos se botaron, brotaba agua con arena, que sepultó los patios”, señala doña María de Lourdes Jiménez, de 65 años. En otros casos las viviendas sufrieron asentamientos diferenciales después de la ocurrencia del sismo.

### 3.3.3. Coatzacoalcos, Veracruz

Se localiza en la zona sur del estado, limita con los municipios de Pajapan, Cosoleacaque, Minatitlán, entre otros, al norte con el Golfo de México, al este con el estado de Tabasco. Se encuentra sobre rocas sedimentarias y suelo aluvial del Cuaternario, en llanura aluvial costera con dunas y salina y llanura aluvial costera inundable; sobre áreas donde originalmente había suelos denominados Arenosol (INEGI, 2009).

#### 3.3.3.1. Evidencia de licuación

Acorde con periódicos locales se registra el hundimiento en la colonia San Silverio donde la vivienda se hundió al menos 1 metro de profundidad, seguido de la “presencia de brotes de agua y arena”,

comenta Julián Cruz Jiménez. En otras viviendas se presentaron asentamientos diferentes debido a la pérdida de resistencia del suelo.

Cabe mencionar que el primer caso documentado sobre licuación de arenas corresponde al sismo de Jáltipan, Veracruz que ocurrió el 26 de agosto de 1959 de  $M_w$  6.4 donde Coatzacoalcos presentó licuación en un relleno hidráulico bajo las bodegas de las instalaciones de Puerto México que colapsaron y dando como resultado la pérdida de 4 vidas humanas (Ovando, E., Segovia, 1996). Los parámetros anteriores evalúan la susceptibilidad de licuación depende en gran medida a factores históricos, es decir, donde se ha presentado el fenómeno de licuación existe una alta posibilidad de recurrencia.

La Figura 46 representan los casos identificados de licuación derivados de la ocurrencia del sismo del 7 de septiembre de 2017 en la zona de estudio (identificados por color naranja), en el mismo mapa se añadieron algunos casos documentados en la literatura sobre licuación en esta zona. Como se observa, sólo en Coatzacoalcos se repitió este fenómeno.

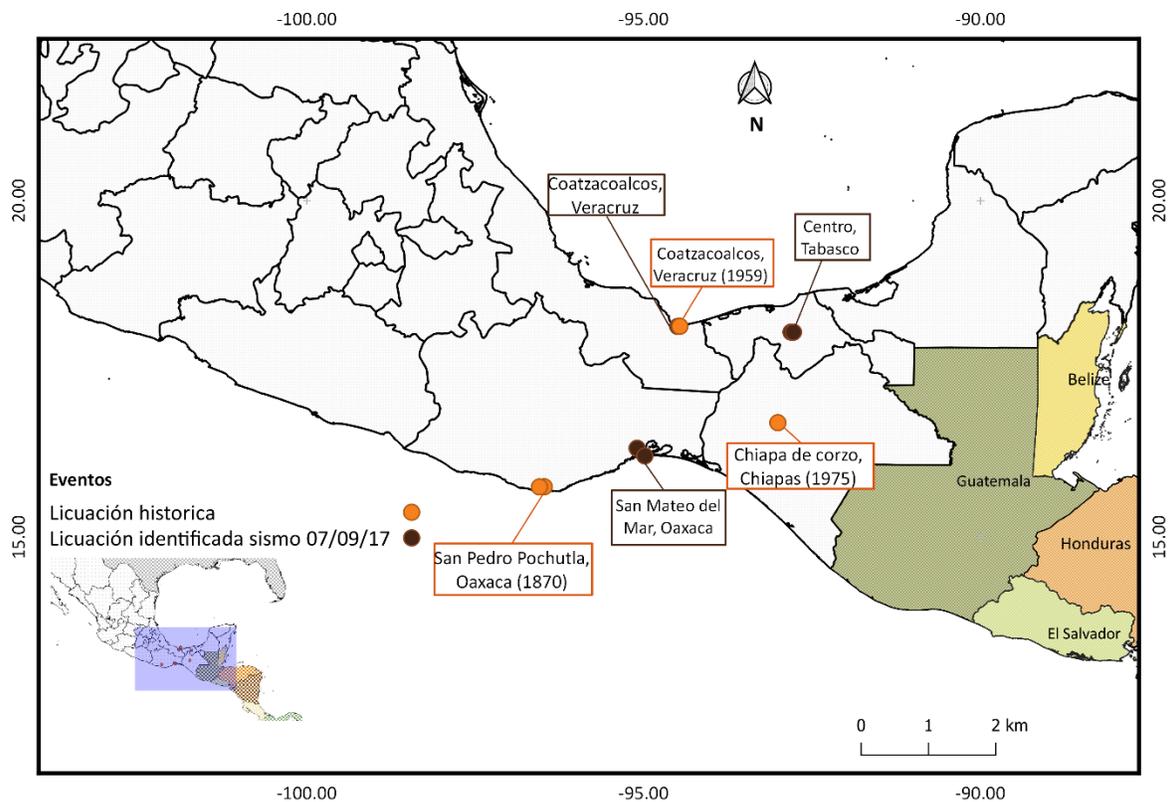


Figura 46. Distribución de los casos de licuación identificados en la base de datos después de la ocurrencia del sismo del 7 de septiembre de 2017 (círculos color café) y otros casos documentados en la zona de estudio (círculos color naranja).

El impacto del fenómeno de licuación en el país, a lo largo de su historia, refleja que existen zonas que tienen una elevada tendencia a repetir el fenómeno de licuación o que es posible que se presente en algunas otras zonas de las cuales no se tenga aún documentado la incidencia de este, por lo que no se debe dejar de lado la estimación de la probabilidad de ocurrencia del fenómeno tomando en cuenta la creación de un mapa de susceptibilidad del suelo a licuación.

### 3.4. Estadísticas de pérdida de vidas

Tras la magnitud del sismo del pasado 7 de septiembre de 2017 el número de pérdidas humanas fue alto. De acuerdo con la organización hábitat México el 8 de septiembre de 2017 se registró el deceso de un total de 32 personas, dos menores en Tabasco, siete en Chiapas según el Secretario de Protección estatal, Luis Manuel García y 23 muertos en Oaxaca de acuerdo con el gobernador de Oaxaca, Alejandro Murat, sin embargo, el número de fallecimientos ascendió al paso de los días. El Centro Nacional de Prevención de Desastres de la Secretaría de Gobernación (SEGOB) informó que el número de pérdidas humanas fue de 99, en Oaxaca 79, en Chiapas 16 y en Tabasco cuatro (Figura 47).

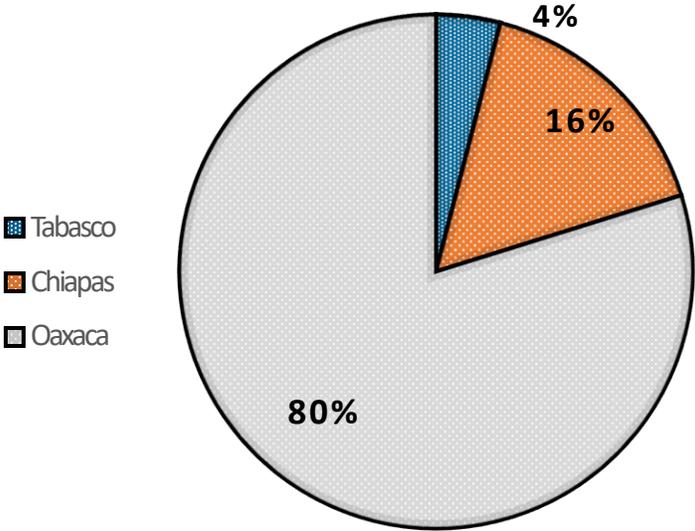


Figura 47. Distribución de las pérdidas humanas por entidad federativa

Oaxaca fue el estado con mayor número de decesos, mientras que Tabasco fue la entidad con el menor número, esto debido a la distancia epicentral del evento y el estado. A pesar de la contabilización de decesos, no existe más información sobre las características y la localización geográfica de las víctimas.

### 3.5. Pérdidas económicas

Es importante mencionar que los daños derivados por el sismo del 7 de septiembre de 2017 se reflejan en pérdidas económicas. De acuerdo con varias fuentes periodísticas, el 15 de septiembre de 2017 el entonces presidente anunció que el número de damnificados ascendía a 300 mil personas, 200 mil en Chiapas y 100 mil en Oaxaca, sin detallar el tipo de afectación de las comunidades afectadas, que no solo afectó sus viviendas, comercios, escuelas, hospitales e iglesias, sino afectó servicios tales como electricidad, agua, gas y en algunos casos el sistema de alcantarillado.

La consultora AIR señaló una pérdida de la industria de seguros de entre 786 y mil 124 millones de dólares con daños en muchas zonas rurales. Respecto a los daños económicos ocasionados por los sismos del 7 y 19 de septiembre de 2017 en estructuras dañadas que no cuentan con seguros el costo de reconstrucción representarían 48 mil millones de pesos. De las cuales poco más de dos terceras partes se localizaron en Oaxaca y Chiapas (Clavellina, 2017). Aquí podría aplicarse el bono catastrófico apoyado por el Banco Mundial por 150 millones de dólares. Sin embargo, es elevado el porcentaje de viviendas sin seguro lo cual bien refleja el alto nivel de pobreza en México, y particularmente en los estados afectados.

Los recursos para la reconstrucción provendrán fundamentalmente del Fondo de Desastres Naturales (FONDEN). Sin embargo, el 3 de octubre de 2017, la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) señaló que el FONDEN contaba con 8 443 millones de pesos. De los cuales, al 5 de octubre de 2017 ya se habrían utilizado poco más de 6 844 millones o 81% de la bolsa total por concepto de Apoyos Parciales Inmediatos que atenderán a las zonas afectadas y a los damnificados, el cuál abarcaba también recursos para el sismo del 7 de septiembre y el del 19 de septiembre de 2017. Por lo que se contaba con el 17.6% del costo económico para cubrir la reconstrucción, a dicho fondo se agrega el bono catastrófico de 150 millones de dólares y la ayuda por parte de asociaciones civiles, fundaciones y ayuda internacional.

### 3.6. Problemas de salud, seguridad y otros

México a través del tiempo ha experimentado las consecuencias de estar localizado en una región de alta sismicidad que desencadena no sólo los daños materiales y pérdidas humanas presentadas ya en este capítulo.

El mecanismo de respuesta por parte del sector salud fue implementado de manera inmediata a través del Operativo para la Seguridad en Salud, coordinado por la Secretaría de Salud en los municipios correspondientes de la región del Istmo. Mediante este protocolo se consideraban dos acciones prioritarias; la primera consistía en la evaluación visual del daño a la infraestructura del sector salud, quedaron inicialmente fuera de servicio y paulatinamente se reestablecieron las actividades, a excepción de aquellos inmuebles que representaban ser un riesgo y la segunda, movilizar a través de la región a los damnificados que requirieran atención. Como acción

complementaria, se integraron unidades con el objetivo de ofrecer servicios de prevención de enfermedades, así como atención médica (Conformadas por un médico general, una enfermera y un promotor de la salud). Por último, dado el daño presentado en algunos inmuebles se reubicó al personal y pacientes a otras unidades cercanas.

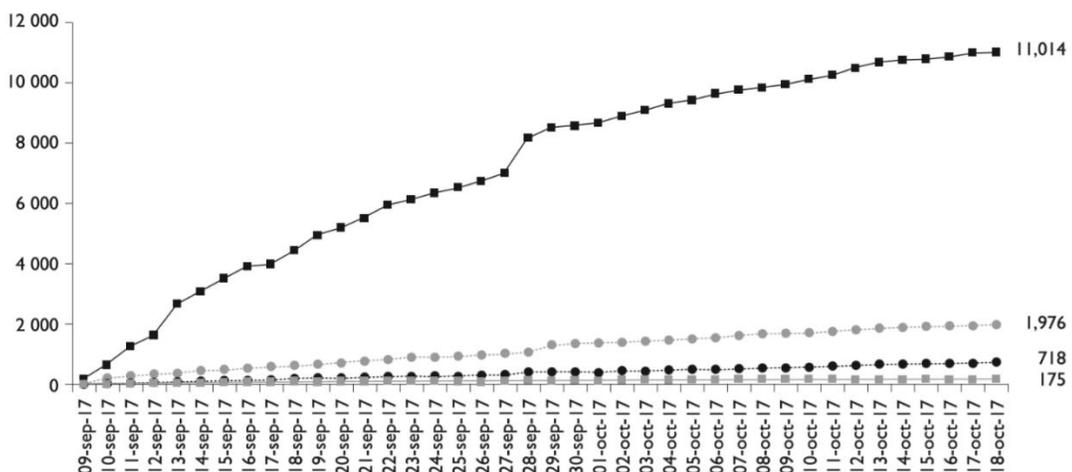
El estado con mayor afectación, de acuerdo con lo presentado en esta tesis, fue Oaxaca, y uno de los municipios más dañados de esta entidad, fue la Heroica Ciudad de Juchitán de Zaragoza, por lo que este estudio se centró específicamente en esta región.

### Principales enfermedades atendidas

De acuerdo con la experiencia internacional, la mayor parte de la demanda de servicios de salud tiene lugar durante las primeras 24 horas posteriores al fenómeno. Mediante casos ya documentados previamente en el país, se esperaba un incremento en las siguientes enfermedades:

- Infecciones respiratorias agudas (IRA)
- Enfermedades diarreicas agudas (EDA)
- Parasitosis
- Enfermedades transmitidas por vector (dengue y paludismo)
- Otras: Hepatitis A, leptospirosis, salmonelosis, varicela, escabiosis, dermatosis, pediculosis y conjuntivitis.

Mediante lo anterior se priorizó la búsqueda de casos con enfermedades de interés epidemiológico; en la Figura 48 se observa que, pese a la búsqueda intencionada de las enfermedades mencionadas, no se observa un brote epidémico directo.



Infección respiratoria aguda    
 Enfermedad diarreica aguda    
 Conjuntivitis    
 Síndrome febril

Figura 48. Acumulación de consultas atendidas en Juchitán, Oaxaca según enfermedades bajo vigilancia epidemiológica. 9 de septiembre a 18 de octubre.

En general, en el estado de Oaxaca a partir de los registros en el Acta Informe de Entrega del Operativo para la Seguridad en Salud por sismo en el istmo de Tehuantepec, Oaxaca, septiembre-octubre, 2017 (con la última actualización del 21 de noviembre), los cinco motivos de consulta fueron:

- Infecciones respiratorias agudas (IRA)
- Diabetes Mellitus
- Embarazo
- Hipertensión arterial
- Otros

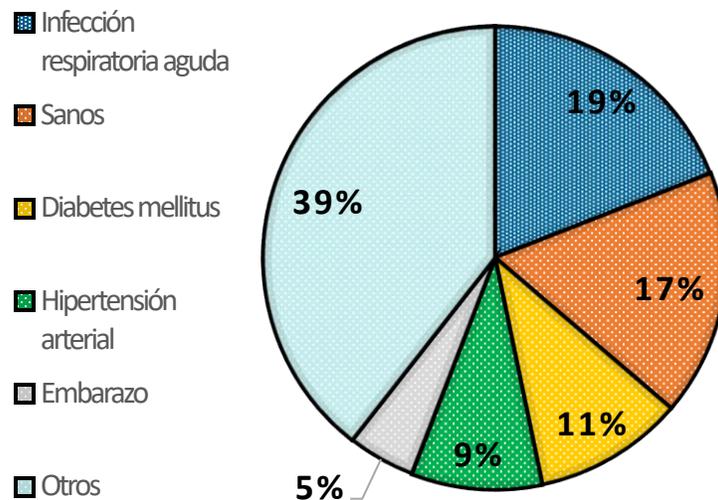


Figura 49. Principales enfermedades presentadas en Oaxaca

La Figura 49 representa las principales enfermedades atendidas en el estado de Oaxaca, específicamente en los 41 municipios declarados en estado de emergencia abarcando el periodo de septiembre a octubre del 2017. El padecimiento con mayor número de atenciones con 39% de atenciones corresponde a otros de donde se desprenden enfermedades como; Hepatitis A, leptospirosis, salmonelosis, varicela, escabiosis, dermatosis, pediculosis y conjuntivitis. Con un 19% se encuentra la infección respiratoria aguda (IRA), un 11% de diabetes mellitus, y finalmente con el 9% y 5%, hipertensión arterial y embarazo, respectivamente.

## Salud mental

Después de un terremoto, hasta 63% de las personas reporta, disminución de la motivación, menor competitividad, pérdida del apetito o de peso, fatiga, síntomas de depresión. Además existe un incremento de los trastornos psiquiátricos como lo son; trastorno por estrés postraumático (TEPT) y el trastorno depresivo (Elizabeth & Campos, 2018). Por otro lado, en un análisis de terremotos, se encontró que el género, el nivel educativo, el daño a la casa, el duelo, las lesiones corporales y la muerte fueron los principales factores de riesgo (Dai W., Chen L., 2016).

Los daños ocasionados por el sismo del pasado 7 de septiembre ocasionaron severas afectaciones en las estructuras de los municipios del Istmo de Tehuantepec debido a las características estructurales, localizaciones estas y otros factores que fueron estudiados en este capítulo. Cabe mencionar que alguno de los daños se suscitó por otros fenómenos ligados a la ocurrencia de un evento sísmico. Los daños de este sismo no solo se miden en aquellas pérdidas en la infraestructura, ya que este evento desencadenó pérdidas humanas y varios problemas en la salud de la población del Istmo.

## Conclusiones

En el capítulo 1 se presentaron los conceptos fundamentales para el desarrollo de cada uno de los temas presentados en esta tesis. Se concluye que la sismicidad en México es muy alta en comparación con otras zonas del mundo y que la ocurrencia de fenómenos sísmicos es algo cotidiano. El peligro sísmico no solo está en función del evento principal, existen otros fenómenos asociados después de la ocurrencia de un sismo, los cuales pueden causar mayor daño que el sismo por sí solo, tales como, tsunamis, deslizamientos, licuación, entre otros. Estos conceptos sirvieron como base para el estudio de los daños derivados del sismo estudiado.

El capítulo 2 proporcionó información sobre la sismicidad histórica de la zona de estudio que estuvo, la cual se definió en función de los daños derivados por la ocurrencia del sismo. De ello se concluye, que, en la zona de daños, es posible que se presenten eventos sísmicos de falla normal a grandes profundidades, los cuales son frecuentes en el país. Los sismos de falla normal a poca profundidad se relacionan directamente con aquellos generadores de tsunamis ya que ocurren hacia el mar. De acuerdo con estudios realizados se expuso que a pesar de la alta actividad sísmica el evento ocurrido presentó características diferentes a otros eventos que hayan ocurrido antes, ya que es considerado el evento intraplaca más fuerte registrado en México debido a la magnitud de este, el área de ruptura asociada al movimiento telúrico nos deja ver que en el estudio de la tectónica de placas se consideran otros factores como los aspectos geológicos debido a que la ruptura de casi toda la litosfera oceánica es consecuencia de la deshidratación de los minerales que la componen ocasionando una mayor fragilidad y por tanto un rompimiento más profundo, dicha afirmación es sustentada de acuerdo a la tendencia de las réplicas.

Las aceleraciones presentes en la región del Golfo de Tehuantepec están asociadas a las zonas más afectadas debido a la distancia epicentral, de acuerdo con los registros sísmicos proporcionados por las estaciones acelerográficas la aceleración máxima corresponde a 293.29 Gal, la cual se distribuye a lo largo de las zonas aledañas que se relacionan directamente con los municipios declarados en estado de emergencia. De acuerdo con la información proporcionada por los registros acelerográficos y la elaboración de espectros de respuesta se concluye que las grandes intensidades afectaron principalmente a períodos de vibrar cortos que corresponden a bajas alturas relacionándose estrechamente con las estructuras predominantes de la zona de estudio.

En el capítulo 3 partiendo de la recopilación de información de los daños derivados tras el sismo del 7 de septiembre de 2017 a través de medios digitales, se concluye que la distribución de los daños por entidad federativa se relaciona con la distancia epicentral de la región estudiada, ya que los estados más afectados corresponden principalmente a Oaxaca y Chiapas, con distancias de 130 km y 120 km, respectivamente y lugares como Puebla y la Ciudad de México con una distancia epicentral de 520 km y 700 km, respectivamente no registraron daños mayores, debido a su lejanía con el epicentro del sismo.

Por otro lado, la distribución por estados de daños con mayor número de casos corresponde a; grave y colapso parcial, esta distribución de daños tiene que ver directamente con estructuración de los inmuebles presentes en los registros. El 72% de los colapsos parciales corresponde a la estructuración clasificada por muros de mampostería sin diafragma con cubierta ligera, mientras que el 39% a aquellos con daños graves. Como se mencionó el comportamiento estructural está en función de la resistencia de los materiales y la configuración estructural. Se concluye que la falta de confinamiento de los materiales utilizados para la construcción, el adobe, principalmente y la cubierta ligera de los techos de teja, no ayudó en el comportamiento de las estructuras debido a sus características.

En el estudio estadístico de los daños derivados por el sismo se agrupó según las patologías presentes en los edificios registrados; la mala calidad de construcción predominó en el estudio con el 75% del total de las patologías contabilizadas, los estados de daños con mayor número de registros corresponden a graves y colapsos parciales. Por lo que es importante mencionar la influencia de un buen proceso constructivo en el comportamiento del sistema estructural y la supervisión de este. El estudio mostró la presencia de otras patologías identificadas en las estructuras registradas, empero, estas representan menos del 2% del total de las patologías contabilizadas. En cambio, se identificaron dos patologías en el estudio de los daños; efecto de esquina y golpeteo con un 11% y 8%, respectivamente, en donde el 35% del total de las viviendas (uso predominante de los inmuebles registrados) se encuentran ubicadas en esquinas, es decir, al menos dos de sus fachadas no cuentan con muros colindantes. Y finalmente, el golpeteo se presentó principalmente por la nula separación entre muros colindantes.

Como se mencionó en el párrafo anterior, la mayoría de los inmuebles dañados corresponde a viviendas con un 66%, por lo que la estructura social más perjudicada corresponde a las familias que habitan el istmo de Tehuantepec, principalmente la gente con mayor número de rezago, de acuerdo incluso también al tipo de estructuración abundante en esta zona.

El análisis de los daños ocasionados a aquellas estructuras agrupadas en mampostería histórica corresponde principalmente a templos de iglesias y palacios municipales. En el caso de las iglesias, construidas entre los siglos XVI y XIX y los daños van de menores hasta algunos casos con colapsos parciales, afectados por su componente vertical. Los daños fueron en bóvedas, cúpulas y campanarios, este último elemento estructural más vulnerable debido a su esbeltez. En tanto a los daños ocasionados a los palacios municipales, que van de menores hasta colapsos parciales, como el caso del palacio municipal de Juchitán, Oaxaca. Al menos 6 de los 41 que pudieran haber padecido daños fueron afectados, esto con base a los 41 municipios declarados en estado de emergencia del estado de Oaxaca.

Los inmuebles de baja altura de los cuales se tiene el mayor número de registros resultaron ser los de mayor riesgo debido a las grandes aceleraciones registradas en las estaciones cercanas al epicentro, para periodos de vibrar cortos correspondientes a aquellos de alturas entre dos y tres niveles.

En general el patrón de daño más común en viviendas y edificios corresponde al agrietamiento diagonal en los muros, y en aquellas estructuras de mampostería confinada que contaron con un buen sistema de construcción el comportamiento fue adecuado, lo que sugiere que este sistema es adecuado para esta región de alta actividad sísmica.

Debido a los diferentes criterios empelados en la clasificación de los estados de daño se dividió el estudio y se contemplaron estructuras de tipo carretero, es decir, puentes y caminos en donde Oaxaca fue la entidad federativa más afectada, acabe resaltar que los puentes y caminos fueron reportados con mayor exactitud debido a la importancia de estas estructuras. En general los daños asociados a estas estructuras han presentado características de daños ligeros, solo pequeños agrietamientos, y en el caso de la estructura de concreto hidráulico se debió a la falta de mantenimiento. El 45% de los caminos presentados en este estudio no cuentan con algún tipo de estructuración, es decir, son solo de terracería. Para el caso de estudio de los puentes se clasificaron con el mismo tipo estructural correspondiente a concreto reforzado; los daños van desde menores a completos, siendo Oaxaca el estado con mayor número de casos registrados el cual se asocia principalmente a la cercanía con el epicentro.

El estudio de los daños derivados por el sismo del 7 de septiembre de 2017 presentó algunas amenazas correspondientes al evento geológico, tales como, un tsunami que no produjo daños estructurales o pérdidas humanas. La amenaza de tsunami alertó a las comunidades cercanas al golfo de Tehuantepec entre las que destacan San Mateo del Mar, Salina Cruz, Puerto Ángel, Puerto Arista, Tapachula, entre otras. Otra amenaza presenté tras la ocurrencia del sismo, fue la licuación que afectó principalmente a los siguientes municipios; San Mateo del Mar, Oaxaca, Centro, Tabasco y Coatzacoalcos, Veracruz. Estas comunidades presentaron dicho fenómeno debido a las características geológicas en donde el nivel de agua freática se encuentra a menos de un metro de profundidad y la edad del depósito es geológicamente joven; la composición del suelo corresponde en los tres casos principalmente a formaciones de arena y solo en un caso (Coatzacoalcos) asociado a algún evento histórico. En la recabación de datos, se recopilaron testimonios que respaldan dicho fenómeno, en donde describen la salida de agua hirviendo y arena a través de las grietas que surgieron tras la ocurrencia del sismo. Nuestro país no solo se puede ver afectado por una amenaza en particular, como se vio en esta tesis, existen otros tipos de eventos que se desencadenan después de un sismo los cuales pueden causar pérdidas económicas y humanas.

En general, los daños estructurales comentados anteriormente están asociados principalmente a las grandes aceleraciones del terreno, con direccionalidad principalmente hacia Juchitán. Es decir, los daños mayores se encuentran ubicados en los municipios cercanos al golfo de Tehuantepec, cercanos al epicentro. La baja calidad de los materiales y la falta de orientación de ingeniería se manifestaron en las deficiencias estructurales resumidas en la escasez de confinamiento de las paredes, escaso refuerzo de acero y detalles deficientes.

Se debe prestar mayor atención en las prácticas de diseño y construcción en zonas identificadas de alta actividad sísmica, con el fin de mitigar los daños estructurales y resguardar la integridad física y mental de las personas que habitan en esta región.

## Referencias

- Acosta, J. y Arellano, G. (2009). Microzonificación sísmica de Tijuana. *CICESE*.
- Asteris, P. G., Repapis, C. C., Foskolos, F., Fotos, A., & Tsaris, A. K. (2017). Fundamental period of infilled RC frame structures with vertical irregularity. *Structural Engineering and Mechanics*, 61(5), 663–674. <https://doi.org/10.12989/sem.2017.61.5.663>
- Bandy, W y Yan, C. (1989). Present-day Rivera-Pacific and Rivera- Cocos relative plate motions (abstract). *Eos Trans*, 70.
- Barbat, A. H. (1998). El riesgo sísmico en el diseño de edificios. *Calidad Siderurgica*.
- Benedetti, D. y Petrini, V. (1984). Sulla vulnerabilità sísmica di edifici in muratura: Prioste di un método di valutazione,. *Lindustria Delle Costruzioni*.
- Beyis, M e Isacks, B. L. (1984). Hypocentral trend surface analysis: Probing' the geometry of Benioff zones. *Geophys. Res*, 89, 6153–6170.
- Bonnet, R. L. (2003). Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada. In *Universidad Politecnica de Cataluña*.
- Bourgeois, J. y Michaud, F. (1991). Active fragmentation of the North American plate at the Mexican triple-junction area off Manzanillo. *Geo Mar*, 11, 59–65.
- Bracci, J. M. (1989). Deterministic model for seismic damage evaluation of RC structures. *Technical Report*.
- Buendía, L. (2016). *Estimación de espectros de vulnerabilidad uniforme para el diseño sísmico de estructuras* (p. 76). p. 76.
- Buendía, L. y Reinoso, E. (2019). Patologías estructurales. *Revista Mexicana de La Construcción*, 637. Retrieved from <http://www.cmic.org/patologias-estructurales/>
- CALTRAS. (2012). *Feasibility Studies for Improving Caltrans' Bridge Fragility Relationship*.
- Castro, R. R., Pérez-Campos, X., Zúñiga, R., Ramírez-Guzmán, L., Aguirre, J., Husker, A., ... Sánchez, T. (2016). A review on advances in seismology in Mexico after 30 years from the 1985 earthquake. *Journal of South American Earth Sciences*, 70(June 1911), 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.05.004>
- Center., P. T. W. (2017). *Tsunami Bulletin Board Tsunami Message Number 1-15, NWS Pacific Tsunami Warning Center Bulletin Sep 8 2017*.

- Clavellina, M. (2017). Costos iniciales de la reconstrucción tras los sismos de septiembre de 2017. *Instituto Belisario Domínguez*, 1–8.
- Córdoba, F. (2018). Los sismos intraplaca de septiembre de 2017: un breve análisis de su impacto en el territorio veracruzano. *UVserva*, (5). <https://doi.org/10.25009/uvserva.v0i5.2567>
- Couch, R., W. S. (1981). Gravity and structure of the continental margins of southwestern Mexico and northwestern Guatemala. *Geophys. Res*, 86, 1829–1840.
- Crisafulli, F., & Villafañe, E. (2002). Espectros De Respuesta Y De Diseño. *Facultad de Ingeniería, U N Cuyo*, 22. Retrieved from <http://blog.uca.edu.ni/estructuras/files/2011/02/espectros-de-respuesta-y-de-diseño.pdf>
- Cruz-Vega, F., Loría-Castellanos, J., Sánchez-Echeverría, J. C., & Sosa-Barragán, R. (2018). Experiencia de un equipo médico de emergencia del IMSS durante el sismo en México en setiembre de 2017. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 42, 1–5. <https://doi.org/10.26633/rpsp.2018.79>
- Dai W., Chen L., L. Z. (2016). The incidence of posttraumatic stress disorder among survivors after earthquakes: a systematic review and meta-analysis. *BMC Psychiatry*, 16, 188–199.
- Dawson A., F. R. y A. A. (1977). Estudio de licuación de arenas en Chiapas. *Instituto de Ingeniería UNAM*.
- Dixon, T., et al. (2000). New kinematic models for Pacific-North America motion from 3 Ma to Present II: Evidence for a “Baja California shear zone. *Geophysical Research Letters*, 27, 3961–3964.
- Durán, O. A. L. C. R. R. (2013). El sismo de Oaxaca del 30 de septiembre de 1999. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Elizabeth, P., & Campos, P. (2018). Impacto de los terremotos en la salud mental. *Ciencia - Academia Mexicana de Ciencias*, 69(3), 48–55. Retrieved from <https://biblat.unam.mx/es/revista/ciencia-academia-mexicana-de-ciencias/articulo/impacto-de-los-terremotos-en-la-salud-mental>
- Ensenada, B. C. (2017). *Reporte Gráfico del Sismo del 7 de septiembre de 2017 ( 8 de septiembre Instrumental ≈ IX. 2017*.
- Felzer y Brodsky. (2006). Decay of aftershock density with distance indicates triggering by dynamic stress. *Nature*, 441, 735–738.
- Figueroa J. (1975). Sismicidad en Oaxaca. *Instituto de Ingeniería, UNAM.*, 360.
- Fuerza México. (2017). Fuerza México; Datos abiertos. (SHCP), *Secretaría de Hacienda y Crédito Público*. Retrieved from [https://www.transparenciapresupuestaria.gob.mx/es/PTP/fuerzamexico\\_datosabiertos](https://www.transparenciapresupuestaria.gob.mx/es/PTP/fuerzamexico_datosabiertos)

- García, V. y Suarez, G. (1996). *Los sismos en la historia de México*.
- Goltz, C. (1998). Fractal and Chaotic properties of Earthquakes. *Springer*.
- Hasselmann, T. K. (1980). Assessment of damageability for existing buildings in a natural hazards environment. *Technical Report, 80*.
- INEGI. (1997). *Estados Unidos Mexicanos*. 39(023), 4955. Retrieved from [http://cuentame.inegi.org.mx/mapas/pdf/nacional/div\\_territorial/nacionalestados\\_sn.pdf](http://cuentame.inegi.org.mx/mapas/pdf/nacional/div_territorial/nacionalestados_sn.pdf)
- INEGI. (2005). *Prontuario de Información Geográfica Municipal; San Mateo del Mar*. 8.
- INEGI. (2006). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Asunción Nochixtlan, Oaxaca Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*.
- INEGI. (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Coatepec , Veracruz de Ignacio de la Llave Clave geoestadística 30038 Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Coatepec , Veracruz de Igna. Clave Geoestadística, 1. Retrieved from <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/30/30189.pdf>
- Isacks, B. y M. (1971). Distribution of stresses in the descending lithosphere from a global survey of focal mechanisms solutions of mantle earthquakes. *Geophys. Space Phys.*, 9, 103–174.
- Kelleher, J. y Sykes, L. (1973). Possible criteria for predicting earthquake locations and their application to major plate boundaries of the Pacific and the Caribbean. *Geophys. Res*, 2547–2585.
- Kingh, G. C. P. et al. (1985). The evolution of the Gulf of Corinth (Greece): an aftershock study of the 1981 earthquakes. *Geophysical Journal International*, 80, 677–693.
- Lomas, E., Uribe, A. y Fernández, S. (1999). Localización del sismo (99-06-15) de Tehuacán, Puebla, mediante la red sismológica de la CFE. 19, 299.
- Manea, M. y Kostoglodov, L. (2005). Tectonic evolution of the Tehuantepec Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 64–77.
- Marsal, R. J. (1961). Behavior of a Sandy Uniform Soil During the Jaltipán Earthquake. *Mexico, Proc. %th Int. Conf. Soil Mech. And Found. Engrn*.
- Martínez, J. Z. (n.d.). *Estudio estadístico de patologías en edificaciones y su influencia en la vulnerabilidad sísmica durante el sismo 19s-2017.pdf*.
- Melgar, D., Ruiz-Angulo, A., Garcia, E. S., Manea, M., Manea, V. C., Xu, X., ... Ramirez-Guzmán, L. (2018). Deep embrittlement and complete rupture of the lithosphere during the M w 8.2

- Tehuantepec earthquake. *Nature Geoscience*, 11(12), 955–960. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0229-y>
- Meng, L., Huang, H., Xie, Y., Bao, H., & Dominguez, L. A. (2019). Nucleation and Kinematic Rupture of the 2017 Mw 8.2 Tehuantepec Earthquake. *Geophysical Research Letters*, 46(7), 3745–3754. <https://doi.org/10.1029/2018GL081074>
- Metodologías, C., & De, D. (n.d.). *Capítulo 7. Metodologías de evaluación de estructuras existentes 7.1.* 129–186.
- Molnar, P., L. R. S. (1969). Tectonics of the Caribbean and Middle America regions from focal mechanisms and seismicity. *Geol. Soc. Am. Bull*, 85, 607–618.
- Moose, F. (1972). The Mexican volcanic belt: Structure and tectonics. *Geofísica Internacional*, 12, 55–70.
- Mota, R., Andrieux J., B. J. (1986). Bosquejo sismotectónico del sur de México. *Geofísica Internacional*, 25, 207–231.
- Naif, S., Key, K., Constable, S. y Evans, R. (2015). Water-rich bending faults at the Middle America trench. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 16, 2582–2597.
- Newmark, N y Rosenblueth, E. (1971). Fundamentals of Earthquake Engineering. *Englewood Cliffs*.
- Niño, M., Jaimes, M y Reinoso, E. (2005). *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural ESTIMACIÓN DE DEMANDAS DE ACELERACIÓN MÁXIMA PARA EL ANÁLISIS DE CONTENIDOS EN EDIFICIOS Miguel A. Jaimes Téllez 1 y Eduardo Reinoso Angulo 1. 6, 1–9.*
- Nunez-Cornu, F., & Ponce, L. (1989). Zonas sísmicas de Oaxaca, Mexico: sísmos máximos y tiempos de recurrencia para el periodo 1542-1988. In *Geofísica Internacional* (Vol. 28).
- Okada y Takai. (1999). Classifications of Structural Types and Damage Patterns of Buildings for Earthquake Field Investigation. *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, 64(524), 65–72. [https://doi.org/10.3130/aijs.64.65\\_5](https://doi.org/10.3130/aijs.64.65_5)
- Ordaz, M. (2008). *Relaciones entre curvas de fragilidad, matrices de probabilidad y funciones de vulnerabilidad.*
- Ovando, E., Ossa, A. y Santoyo, E. (2013). Effects of regional subsidence and earthquakes on architectural monuments in MEXICO CITY. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1), 157–167. <https://doi.org/10.18268/BSGM2013v65n1a12>
- Ovando, E., Segovia, J. (1996). Licuación de arenas. *TGC Geotecnia*, 55.
- Palomino, R. M. J. A. J. B. (1986). *Bosquejo sísmo tectónico del sur de México.pdf* (p. 24). p. 24.

- Pardo, M. y Suarez, G. (1995). Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: seismic and tectonic implications. *Journal of Geophysical Research*, 100(B7).
- Park, R. y Ang, A. (1987). Damage limiting aseismic desing of buildings. *Earthquake SpectraEa*, 3(1), 1–26.
- Peacock, S. M. (2001). Are the lower planes of double seismic zones caused by serpentine dehydration in subducting oceanic mantle. *Geology*, 29, 299–302.
- Penzien, J. (1993). Seismic desing criterian for transpotation structutes, structural engineering in natural hazards mitigation. *Congress, Proceedings ASCE Structures*, 1, 4–36.
- Pérez-Campos, X., Kim, Y. H., Husker, A., Davis, P. M., Clayton, R. W., Iglesias, A., ... Gurnis, M. (2008). Horizontal subduction and truncation of the Cocos Plate beneath central Mexico. *Geophysical Research Letters*, 35(18), 1–6. <https://doi.org/10.1029/2008GL035127>
- Petrovski, J. (1989). *Evaluation of vulnerability and potential seismic risk level of buildings*.
- Pozos, A., Chávez, M., Jaimes, M. y Guerrero, H. (2019). Damages observed in locations of Oaxaca due to the Tehuantepec Mw8.2 earthquake, Mexico. *Natural Hazards*, (3000). <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03662-9>
- Ramírez-Herrera, M. T., Corona, N., Ruiz-Angulo, A., Melgar, D., & Zavala-Hidalgo, J. (2018). The 8 September 2017 Tsunami Triggered by the M w 8.2 Intraplate Earthquake, Chiapas, Mexico. *Pure and Applied Geophysics*, 175(1), 25–34. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1765-x>
- Ranero, C. y Morgan, J. (2003). Bending-related faulting and mantle serpentinization at the Middle America trench. *Nature*, 425, 367–373.
- Ranero, C., Villaseñor, A., Phipps y Morgan, J. (2005). Relationship between bend-faulting at trenches and intermediate-depth seismicity. 6.
- Reinoso Angulo, E. (1996). *Algunos resultados recientes sobre el peligro sísmico en la Ciudad de México* (p. 24). p. 24.
- Rodríguez-Sánchez, D. I., Escamilla-Santiago, R. A., García-Rodríguez, G., & López-Cervantes, M. (2018). Terremotos y salud en México: Atención de la emergencia en el Istmo de Tehuantepec. *Salud Publica de Mexico*, 60(2), S90–S96. <https://doi.org/10.21149/9405>
- (SMN), S. M. N. (2017). Registro de variaciones del nivel del mar en las estaciones del Servicio Mareogra fíco Nacional causadas por el sismo del 7 de septiembre de 2017 al suroeste de Pijijiapan, Chiapas, UNAM. Reporte UNAM.
- Sahakian, V. J., Melgar, D., Quintanar, L., Ramírez-Guzmán, L., Pérez-Campos, X., & Baltay, A. (2018). Ground motions from the 7 and 19 september 2017 tehuantepec and Puebla-Morelos, Mexico, earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(6), 3300–3312. <https://doi.org/10.1785/0120180108>

- Sánchez, A. (2018). *19 edificios como 19 heridas Por qué el sismo nos pegó tan fuerte* (Grijalbo, Ed.). México.
- Senado de la Republica, M. (2017). Extensión territorial de la tragedia. *Notas Estrategicas*, 1(17), 1–8. Retrieved from [http://bibliodigitalibd.senado.gob.mx/bitstream/handle/123456789/3721/2017\\_16\\_NE\\_Recuento de daños\\_231017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://bibliodigitalibd.senado.gob.mx/bitstream/handle/123456789/3721/2017_16_NE_Recuento%20de%20da%C3%B1os_231017.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Silva, M. G. (n.d.). *Demanda Sísmica En Colombia Para Nuevos Criterios De Diseño Sismorresistente*. Retrieved from [http://www.smie.org.mx/SMIE\\_Articulos/co/co\\_11/21.PDF](http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_11/21.PDF)
- Singh, S. y Suarez, G. (1985). The Oaxaca, Mexico, earthquake of 1931: lithospheric normal faulting in the subducted Cocos Plate. *Nature*, 317, 56–58.
- Singh, S.K., Wyss, M. (1976). Source parameters of the Orizaba earthquake of August 28, 1973. *Geofisica Internacional*, 16, 165–184.
- SSN. (2017). *Sismo de 7 de Septiembre de 2017*.
- Stoiber, R. E., C. M. J. (1973). Quaternary volcanic and tectonic segmentation of Central-America. *Bull Seism. Soc. Am.*, 67, 1051–1060.
- Suárez, G. (1991). El Sismo De Jalapa Del 3 De Enero De 1920. *Revista de Ingeniería Sísmica*, p. 3. <https://doi.org/10.18867/ris.42.290>
- Suárez, G. y López, A. (2015). Sismicidad en el Sudoeste del Golfo de México: Evidencia de deformación activa tras-arco. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32(1), 77–83.
- Suárez, G., Santoyo, M. A., Hjorleifsdottir, V., Iglesias, A., Villafuerte, C., & Cruz-Atienza, V. M. (2019). Large scale lithospheric detachment of the downgoing Cocos plate: The 8 September 2017 earthquake (M w 8.2). *Earth and Planetary Science Letters*, 509, 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.12.018>
- IS-II-UNAM. (2017). *Unidad de Instrumentación Sísmica*.
- Wiens, D. A., W. M. E. (1998). Recent oceanic intraplate earthquake in Balleny Sea was largest ever detected. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 353–354.
- Yépez, F. (1996). Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras aplicando técnicas de simulación. *Universidad Politecnica de Cataluña*.