



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BÁSICAS



**CÁLCULO DEL ESPECTRO MEDIO CONDICIONAL INTEGRANDO
EFECTOS DE SITIO PARA VILLA JALUPA, JALPA DE MÉNDEZ,
TABASCO, MÉXICO**

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO GEOFÍSICO**

PRESENTA

**DAVID GUSTAVO AGUILAR ARIAS
AMÉRICA MONSERRAT GARCÍA HERNÁNDEZ**

DIRECTOR

M. C. CARMEN MARICELA GÓMEZ ARREDONDO

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de **Cunduacán**, el día **23** del mes **noviembre** del año **2024**, los que suscriben **David Gustavo Aguilar Arias** y **América Monserrat García Hernández** alumnos del Programa de **Ingeniería Geofísica** con número de matrícula **192A19008** y **192A19003** respectivamente, adscritos a la **División Académica de Ciencias Básicas**, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autores de la Tesis presentada para la obtención del **título de Ingeniero Geofísico** y titulada **Cálculo del Espectro Medio Condicional Integrando Efectos de Sitio para Villa Jalupa, Jalpa de Méndez, Tabasco, México** dirigida por **M. C. Carmen Maricela Gómez Arredondo**.

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a 23 de noviembre 2024.



David Gustavo Aguilar Arias



América Monserrat García Hernández

DIRECCIÓN

Cunduacán, Tabasco; a 21 de noviembre de 2024.

**C. AMÉRICA MONSERRAT GARCÍA HERNÁNDEZ
PASANTE DE LA LIC. EN INGENIERÍA GEOFÍSICA
PRESENTE**

Por medio del presente, me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que proceda a la impresión del trabajo titulado “**CÁLCULO DEL ESPECTRO MEDIO CONDICIONAL INTEGRANDO EFECTOS DE SITIO PARA VILLA JALUPA, JALPA DE MÉNDEZ, TABASCO, MÉXICO**”, dirigido por la Mtra. Carmen Maricela Gómez Arredondo, bajo la modalidad de titulación por **TESIS**. La comisión de revisión conformada por el Mtro. Guillermo Chávez Hernández, Mtra. Carmen Maricela Gómez Arredondo y Mtro. Miguel Ángel Guzmán de la Cruz, liberó el documento en virtud de que reúne los requisitos para el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente.

Sin otro particular, reciba usted un cordial saludo.

ATENTAMENTE





**DRA. HERMICENDA PÉREZ VIDAL
DIRECTORA**

C.c.p. Archivo.

DIR'DRA.HPV/kfvg

Km.1 Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, A.P. 24, C.P. 86690, Cunduacán, Tab., México.
Tel/Fax: (993) 3581500 Ext. 6702,6701 E-Mail: direccion.dacb@ujat.mx

www.ujat.mx

DIRECCIÓN

Cunduacán, Tabasco; a 21 de noviembre de 2024.

**C. DAVID GUSTAVO AGUILAR ARIAS
PASANTE DE LA LIC. EN INGENIERÍA GEOFÍSICA
PRESENTE**

Por medio del presente, me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que proceda a la impresión del trabajo titulado "CÁLCULO DEL ESPECTRO MEDIO CONDICIONAL INTEGRANDO EFECTOS DE SITIO PARA VILLA JALUPA, JALPA DE MÉNDEZ, TABASCO, MÉXICO", dirigido por la Mtra. Carmen Maricela Gómez Arredondo, bajo la modalidad de titulación por **TESIS**. La comisión de revisión conformada por el Mtro. Guillermo Chávez Hernández, Mtra. Carmen Maricela Gómez Arredondo y Mtro. Miguel Ángel Guzmán de la Cruz, liberó el documento en virtud de que reúne los requisitos para el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente.

Sin otro particular, reciba usted un cordial saludo.

ATENTAMENTE



**DRA. HERMICENDA PÉREZ VIDAL
DIRECTORA**

C.c.p. Archivo.

DIR'DRA.HPV/kfvg

Km.1 Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, A.P. 24, C.P. 86690, Cunduacán, Tab., México.
Tel/Fax: (993) 3581500 Ext. 6702,6701 E-Mail: direccion.dacb@ujat.mx

www.ujat.mx

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a **23 de Noviembre 2024.**

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTOR(A) y/o AUTORES(RAS) en la producción, creación y/o realización de la obra denominada **Cálculo del Espectro Medio Condicional Integrando Efectos de Sitio para Villa Jalupa, Jalpa de Méndez, Tabasco, México.**

Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

COLABORADORES



David Gustavo Aguilar Arias



América Monserrat García Hernández



M. C. Carmen Maricela Gómez Arredondo

TESTIGOS



Fanny Hernández Selvan



José Eduardo Ochoa Arias

DICTAMEN DEL SOFTWARE ANTIPLAGIO

LICENCIATURA - CÁLCULO DEL ESPECTRO MEDIO CONDICIONAL INTEGRANDO EFECTOS DE SITIO PARA VILLA JALUPA, JALPA DE MÉNDEZ, TABASCO, MÉXICO

ORIGINALITY REPORT

16%

SIMILARITY INDEX

PRIMARY SOURCES

1	hdl.handle.net Internet	389 words — 3%
2	proteccioncivil.durango.gob.mx Internet	148 words — 1%
3	tesis.ucsm.edu.pe Internet	137 words — 1%
4	www.scielo.org.mx Internet	115 words — 1%
5	www.tdx.cat Internet	108 words — 1%
6	repository.udistrital.edu.co Internet	103 words — 1%
7	idoc.pub Internet	83 words — 1%
8	www.revistacienciaamc.edu.mx Internet	76 words — 1%
9	tesis.ipn.mx Internet	66 words — < 1%



Dedicatoria

El resultado de este trabajo se lo dedico a mi familia y amigos ya que ellos me han ayudado a ser la persona que soy hoy. Principalmente le dedico este trabajo y esfuerzo a mi madre y mi hermana quienes han sido mi principal motivación para no rendirme ante las dificultades de la vida.

David Gustavo Aguilar Arias

A mi madre, quien ha sido el pilar y el apoyo constante en cada uno de los proyectos que he emprendido a lo largo de mi vida.

América Monserrat García Hernández

Agradecimientos

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que me han acompañado a lo largo de todo este proyecto. En primera instancia me gustaría agradecer a M. C. Carmen Maricela Gómez Arredondo por haberme guiado a mí y a mi compañera durante todo este trabajo. A mi compañera de tesis América le agradezco por la paciencia que tuvo conmigo y porque no habría logrado culminar este trabajo sin ella. Le doy las gracias a mi madre María del Carmen y mi hermana Priscila Guadalupe porque jamás permitieron que me rindiera y siempre me alentaron a superarme. Agradezco a mis compañeros de universidad por siempre alentarme y aconsejarme, particularmente a Eduardo y Tila. Agradezco a Tiara Camila por haberme escuchado cada vez que enfrente alguna dificultad durante el desarrollo de este trabajo. Finalmente agradezco a Dios y a la vida por haberme permitido llegar a este momento de mi carrera.

David Gustavo Aguilar Arias

Índice

Resumen	8
Abstract.....	8
Capítulo I: Generalidades	9
1.1 Introducción.....	9
1.2 Objetivos.....	12
1.2.1 General.....	12
1.2.2 Específicos.....	12
1.3 Problemática	13
1.4 Hipótesis	15
1.5 Justificación	16
1.6 Antecedentes.....	17
Capítulo II: Marco Teórico.	20
2.1 Sismos.....	20
2.1.1 Clasificación de los sismos.....	21
2.1.2 Magnitud e intensidad de un sismo	21
2.1.3 Ondas sísmicas.....	24
2.2 Análisis Probabilístico de Peligro Sísmico (PSHA).....	25
2.2.1 Modelos geométricos de fuentes sismogénicas	27
2.2.2 Ecuaciones de predicción de movimiento del suelo.....	28
2.2.3 Espectros de peligro sísmico	30
2.3 Fundamento matemático del cálculo del Espectro Medio Condicional	33
2.4 Marco geológico	35
2.5 Regionalización sísmica	38

2.5.1	Periodo de vibración fundamental de una estructura.....	40
2.5.2	Efectos de sitio.....	41
2.5.3	Parámetro V_{s30}	42
2.5.4	Factores de amplificación	44
Capítulo III: Metodología.....		45
3.1	Síntesis de metodología	45
3.2	Zona de estudio.....	47
3.3	PSHA para Tabasco	48
3.4	Análisis de los valores de V_{s30} en Tabasco.....	53
3.5	Cálculo de los espectros finales.....	55
Capítulo IV: Resultados.....		57
4.1	Periodo de retorno de 475 años	57
4.1.1	Resultados en roca.....	57
4.1.2	Resultados en suelo.....	60
4.2	Periodo de retorno de 2475 años.....	63
4.2.1	Resultados en roca	63
4.2.2	Resultados en suelo.....	66
Capítulo V: Discusiones y conclusiones.....		69
Bibliografía.....		74
Anexos		81

Índice de figuras.

Figura 1 Valores de PGA con 10% de probabilidad de excedencia en un periodo de exposición de 50 años. Elaborado por los autores a partir de datos del GSHP.....	18
Figura 2 Elementos fundamentales de un sismo. Extraído de Tarbuck y Lutgens.	20
Figura 3 Cuatro pasos para el PSHA, extraído de Kijko, 2020. Paso 1: identificación y parametrización de fuentes sísmicas; paso 2: cálculo de tasas de ocurrencia; paso 3: cálculo de relaciones de atenuación; paso 4: integración de incertidumbres obtenidas.....	26
Figura 4 Área fuente con 8 vértices, extraído de Ordaz M. and Salgado-Gálvez M.A. (2020).....	28
Figura 5 Mapa de la geología de Tabasco, elaborado por los autores a partir de datos del Banco de Datos del SGM.....	36
Figura 6 Mapa de la geomorfología de Tabasco, elaborado por los autores a partir de datos del Banco de Datos del SGM.	37
Figura 7 Mapa de regionalización sísmica, extraído de CFE, 2015.	38
Figura 8 Mapa de peligro sísmico de acuerdo con el atlas de peligro de Tabasco, extraído de SGM & SCAOP, 2013. A la izquierda se puede apreciar el mapa para todo el estado mientras que a la derecha se aprecia un acercamiento al municipio de Jalpa de Méndez.....	39
Figura 9 Simulación de un efecto de sitio extraído de Pérez Calderón, 2018. Representación del aumento de amplitud de las ondas en conjunto con la prolongación de la duración de la sacudida sísmica, modificando su espectro de frecuencia al atravesar suelos blandos.	42
Figura 10 Mapa de la localización de la zona de estudio. El punto en amarillo representa la coordenada que se utilizó para los espectros.	47
Figura 11 Ventana del programa R-CRISIS para añadir mapas de referencia. Se puede apreciar el archivo shapefile del mapa de división municipal de Tabasco.	48
Figura 12 Fuentes sísmogénicas empleadas en el PSHA de Tabasco. Elaborado por los autores. Se puede apreciar el tipo de sismicidad de la fuente así como los límites de placas.	49

Figura 13 Definición de la geometría (ventana izquierda) y los parámetros sísmicos (ventana derecha) de las fuentes sísmicas en R-CRISIS.	49
Figura 14 Ventana para definir los parámetros globales en el programa R-CRISIS. En esta sección se introduce el periodo de exposición, se puede trabajar con múltiples periodos de exposición y de retorno.	52
Figura 15 Visualización del grid recortado en el software Surfer 16. El grid cubre toda la superficie de Tabasco y parte de los estados que colindan con él.	53
Figura 16 Mapa de V_{s30} para Tabasco. Se puede apreciar que predominan valores entre 200 y 275 m/s.	54
Figura 17 Ventana del software R-CRISIS para realizar la desagregación del peligro sísmico.	55
Figura 18 Ventana de R-CRISIS para calcular el CMS. La curva roja representa el UHS a partir del cual se obtiene el CMS; la curva verde gruesa es el CMS para Jalpa de Méndez en el punto de interés mientras que las curvas verde delgadas representan la desviación estándar de los datos.	56
Figura 19 Mapa de aceleraciones del suelo en Tabasco para un periodo estructural de 0.15 s considerando el medio de propagación como roca.	57
Figura 20 UHS correspondiente a Villa Jalupa, Jalpa de Méndez considerando el medio de propagación como roca.	58
Figura 21 CMS correspondiente a Villa Jalupa, Jalpa de Méndez considerando el medio de propagación como roca para un periodo condicionante de 0.15 s.	58
Figura 22 Desagregación del peligro sísmico para Villa Jalupa, Jalpa de Méndez para un periodo estructural de 0.15 s y un periodo de retorno de 475 años considerando el medio de propagación como roca.	59
Figura 23 Mapa de aceleraciones del suelo en Tabasco para un periodo estructural de 0.15 s considerando el medio de propagación como suelo.	60

Figura 24 UHS considerando efectos de sitio para Villa Jalupa, Jalpa de Méndez. La curva roja es el UHS utilizando la malla de V_{s30} y la curva negra es el UHS seleccionando un tipo de suelo en la GMPE de Zhao et al. (2006).....	61
Figura 25 CMS considerando efectos de sitio para Villa Jalupa, Jalpa de Méndez para un periodo condicionante de 0.15 s.....	61
Figura 26 Desagregación del peligro sísmico para Villa Jalupa, Jalpa de Méndez para un periodo estructural de 0.15 s y un periodo de retorno de 475 años considerando el medio de propagación como suelo.	62
Figura 27 Mapa de aceleraciones del suelo en Tabasco para un periodo estructural de 0.15 s considerando el medio de propagación como roca.	63
Figura 28 UHS para Villa Jalupa, Jalpa de Méndez considerando el medio de propagación como roca.....	64
Figura 29 CMS para Villa Jalupa, Jalpa de Méndez considerando el medio de propagación como roca para un periodo condicionante de 0.15 s.....	64
Figura 30 Desagregación del peligro sísmico para Villa Jalupa, Jalpa de Méndez para un periodo estructural de 0.15 s y un periodo de retorno de 2475 años considerando el medio de propagación como roca.	65
Figura 31 Mapa de aceleraciones del suelo en Tabasco para un periodo estructural de 0.15 s considerando el medio de propagación como suelo.	66
Figura 32 UHS considerando efectos de sitio para Villa Jalupa, Jalpa de Méndez. La curva roja es el UHS utilizando la malla de V_{s30} y la curva negra es el UHS seleccionando un tipo de suelo en la GMPE de Zhao et al. (2006).....	67
Figura 33 CMS considerando efectos de sitio para Villa Jalupa, Jalpa de Méndez con un periodo condicionante de 0.15 s.....	67
Figura 34 Desagregación del peligro sísmico para Villa Jalupa, Jalpa de Méndez para un periodo estructural de 0.15 s y un periodo de retorno de 2475 años considerando el medio de propagación como suelo.	68

Figura 35 Mapa de las isolíneas de aceleración y la geología de Tabasco. Las isolíneas corresponden al mapa de aceleración contemplando efectos de sitio para un período de 0.15 s y un período de retorno de 475 años. 69

Figura 36 Comparación de los espectros probabilísticos para un periodo de retorno de 475 años. Las curvas negra y roja corresponden al UHS en roca y suelo respectivamente mientras que las curvas azul y verde corresponden al CMS en roca y suelo respectivamente. 71

Figura 37 Comparación de los espectros probabilísticos para un periodo de retorno de 2475 años. Las curvas negra y roja corresponden al UHS en roca y suelo respectivamente mientras que las curvas azul y verde corresponden al CMS en roca y suelo respectivamente. 72

Índice de tablas

Tabla 1: Descripción de la escala modificada de Mercalli	23
Tabla 2: Definición de clases de sitios con base a V_{s30} por el NEHRP.....	43
Tabla 3: Periodos estructurales utilizados para las ordenadas espectrales.....	51

**CÁLCULO DEL ESPECTRO MEDIO
CONDICIONAL INTEGRANDO EFECTOS DE
SITIO PARA VILLA JALUPA, JALPA DE
MÉNDEZ, TABASCO, MÉXICO**

Resumen

En el presente trabajo se implementa la metodología del análisis probabilístico de peligro sísmico para obtener espectros que sean de utilidad al momento de estudiar el peligro sísmico de la región en la localidad de Villa Jalupa, Jalpa de Méndez, Tabasco. En primera instancia se realiza un análisis probabilístico de peligro sísmico para el estado de Tabasco, a partir del cual se obtuvo el espectro de peligro uniforme. Posteriormente, con el fin de que el espectro final tomara en cuenta los efectos de sitio, se añadió una malla con valores de V_{s30} obtenidos a partir del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Adicional a esto, en la búsqueda de la identificación de los escenarios de mayor contribución al peligro sísmico, se realizó una desagregación de combinaciones de magnitud y distancia epicentral. Finalmente, a partir del espectro con efectos de sitio se obtuvo el espectro medio condicional, el cual es el que se propone como espectro probabilístico final, ya que no considera una distribución uniforme del peligro sísmico.

Palabras clave: Espectro de respuesta, Espectro de Peligro Uniforme, Espectro Medio Condicional, análisis probabilístico de peligro sísmico, efectos de sitio, aceleración máxima del suelo, desagregación del peligro sísmico

Abstract

In this paper, the methodology of probabilistic seismic hazard analysis is implemented to obtain spectrums that will be useful for studying the seismic hazard in the region of Villa Jalupa, Jalpa de Méndez, Tabasco. Initially, a probabilistic seismic hazard analysis for the state of Tabasco was conducted, resulting in a uniform hazard spectrum. Subsequently, to ensure that the final spectrum accounted the site effects, a grid with V_{s30} values obtained from the United States Geological Survey was added. Additionally, in the search for identifying scenarios with the highest contribution to seismic hazard, a disaggregation of combination of magnitude and epicentral distance was performed. Finally, from the spectrum considering site effects, the conditional mean spectrum was derived, which is proposed as the final probabilistic spectrum, as it does not assume a uniform distribution of seismic hazard.

Key words: Response spectra, Uniform Hazard Spectrum, Conditional Mean Spectrum, probabilistic seismic hazard analysis, site effects, peak ground acceleration, seismic hazard disaggregation.

Capítulo I: Generalidades

1.1 Introducción

No existe peligro natural libre de ajuste humano; cuando se habla de algún peligro o riesgo automáticamente se liga a un componente humano o social. Cotidianamente se suele usar la palabra riesgo como sinónimo de peligro, pero la realidad es que ambos términos, si bien están relacionados, no hacen referencia a lo mismo. Los peligros son todos aquellos eventos o procesos naturales que pueden causar algún daño económico, social o ambiental, mientras que un riesgo es la probabilidad de que un elemento dado en un espacio y tiempo específico sea afectado por la ocurrencia de un peligro (Ocola, 2019).

Los eventos sísmicos representan una de las manifestaciones más devastadoras de la naturaleza puesto que llegan a generar pérdidas humanas y destrucción a la infraestructura en cuestión de minutos (Bonett-Díaz, 2003). Por lo anterior, los análisis de peligro y riesgo sísmico han sido cada vez más adoptados como elementos clave para definir la amenaza sísmica presente en cualquier área del planeta con el fin de minimizar el impacto de los sismos en la sociedad.

El peligro sísmico es la descripción cuantitativa de las probabilidades de ocurrencia de sismos de diferentes características en un determinado lapso, mientras que el riesgo sísmico es la descripción probabilística de las consecuencias esperadas de los daños que pueden ocurrir debidos a un evento sísmico cualquiera tomando en cuenta las probabilidades de ocurrencia de ese sismo (Esteva-Maraboto, 2018). Entonces, todo peligro se vuelve un riesgo a partir de la presencia del factor humano.

El concepto de vulnerabilidad sísmica hace referencia a la susceptibilidad de un asentamiento humano para sufrir daños provocados por un terremoto; es decir, el grado de dificultad con que podrían presentarse daños en dicho asentamiento tras ocurrir un sismo cualquiera (Ocola, 2019). Debido a esto es que para poder conocer el riesgo sísmico en una región se necesita conocer la vulnerabilidad y el peligro sísmico en la misma y, a su vez, para poder reducir la vulnerabilidad sísmica de la región se necesita conocer el peligro sísmico.

En su forma más simple, el peligro sísmico en un sitio se expresa por medio del valor esperado de la tasa de ocurrencia, por unidad de tiempo (años), de movimientos del terreno con intensidades iguales o mayores de cada valor dado (Esteve-Maraboto, 2018). Lo anterior, supone que es constante en el tiempo, aunque dentro de este pensamiento se ignore la posibilidad de cambios que dicho valor esperado pueda sufrir de acuerdo con la historia sísmica precedente. Para estudiar el peligro sísmico se pueden seguir dos enfoques: determinístico y probabilístico.

El análisis de peligro sísmico determinístico (*DSHA* por sus siglas en inglés) involucra la evaluación inicial del terremoto con mayor magnitud posible para cada una de las diversas fuentes sísmicas, como fallas activas o zonas de fuente sísmica (*Senior Seismic Hazard Analysis Committee* [SSHAC], 1997). Al trabajar con un único escenario los cálculos son más rápidos, pero posee una desventaja notable la cual es la selección del escenario sísmico correcto. El enfoque probabilista (*PSHA*, por sus siglas en inglés) surge entonces como una alternativa que elimina la incertidumbre de seleccionar el escenario sísmico correcto al considerar múltiples escenarios sísmicos. Por lo anterior se podría decir que el análisis probabilista está compuesto de múltiples análisis determinísticos.

Un *PSHA* da como resultado mapas de peligro sísmico, curvas de excedencia y espectros de peligro sísmico uniforme (*UHS*, por sus siglas en inglés). El *UHS* resulta muy útil para estimar la demanda sísmica atribuible a una estructura, lo cual ayuda a reducir la vulnerabilidad sísmica ya que se construyen edificios con diseño sismorresistente que tengan una mayor probabilidad de sufrir menos daño durante un sismo.

Existen diferentes espectros sísmicos, de manera general todos los espectros son representaciones gráficas de aceleraciones contra periodos estructurales. El *UHS* debe su nombre al hecho de que todas sus ordenadas espectrales tienen la misma probabilidad de excedencia, su forma espectral depende de las características del sismo que más contribuye al peligro sísmico de la región de interés (Álvarez, 2021).

El problema con el *UHS* es que este espectro considera que el peligro se distribuye de manera uniforme, así como también considera que todos los escenarios sísmicos tienen igual contribución al peligro sísmico. La alternativa para combatir lo anterior resulta en el espectro medio condicional (*CMS*, por sus siglas en inglés), el cual ya no considera una distribución de

peligro sísmico uniforme, sino que realiza una desagregación de peligro sísmico para identificar el escenario más probable a ocurrir y que tiene una mayor contribución al peligro sísmico (López-Jara, 2016). El *CMS* resulta entonces en una herramienta que nace a partir del UHS y brinda resultados más apegados a la realidad, por lo cual reduce cualquier sobrestimación que los otros espectros puedan realizar.

Debido a la falta de cultura en prevención sísmica, la sociedad tiende a despreciar el peligro sísmico dentro de una zona de baja sismicidad, tal es el caso de Tabasco. En este estado, donde se cuenta con una columna de espesor considerable de materiales no consolidados, característica asociada a los efectos de sitio (amplificaciones en las ondas sísmicas), resulta de gran ayuda implementar estas nuevas metodologías de desarrollo de espectros de peligro sísmico de la forma más realista posible.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Calcular un espectro medio condicional que considere los efectos de sitio en la zona Villa Jalupa, Tabasco para utilizar el resultado como criterio de seguridad en las estructuras a construir en un futuro.

1.2.2 Específicos

Elaborar un mapa de peligro sísmico del estado de Tabasco para obtener un espectro de peligro uniforme de la zona de estudio.

Identificar los valores predominantes del parámetro V_{s30} para poder considerar los efectos de sitio en los espectros.

Realizar la desagregación del peligro sísmico para conocer el escenario sísmico con mayor riesgo en la zona de estudio.

Integrar los resultados obtenidos para calcular el espectro medio condicional que contemple los efectos de sitio en la zona de estudio con el fin de mostrar los valores más próximos a la realidad de aceleraciones.

1.3 Problemática

De acuerdo con el Atlas Nacional de Riesgos, México es un país cuyo territorio está conformado, en dos terceras partes, por sistemas montañosos donde se conjugan factores geológico-geotécnicos, geomorfológicos, estructurales y climáticos que definen zonas inestables, donde existen sobre y debajo de ellas desarrollos urbanos y rurales, así como infraestructura civil, que podrían causar daños a bienes expuestos y a la población.

El estado de Tabasco es considerado como una región en la que los sismos no representan un peligro notable (CFE, 2015); sin embargo, aunque se está a más de 300 km de distancia de una zona sísmicamente activa, relacionada con la convergencia de las placas tectónicas Cocos-Norte América y el movimiento transformante entre las placas Caribe-Norte América algunos eventos de magnitudes moderadas ocurridos en los límites de placas Cocos-Norte América han sido sentidos en la entidad.

Tabasco se encuentra en una zona donde el espesor de los sedimentos llega a ser considerable y se tiene una gran abundancia de suelos, se han identificado al menos 19 grupos distintos de suelo (Palma-López et al., 2014), por lo cual ante la ocurrencia de eventos sísmicos se pueden presentar efectos de sitio. Los efectos de sitio son las amplificaciones que experimentan las ondas atenuadas del sismo debido a la presencia de irregularidades geológicas, capas de suelo y/o una geometría irregular de las interfases entre medios con distintas propiedades (Chávez-García y Montalva, 2014). Entonces se comprende que, estar lejos de las zonas de subducción no garantiza que los sismos no puedan llegar a causar daños severos en el estado.

La vulnerabilidad sísmica de una estructura depende en cierta medida de las propiedades del terreno donde se encuentre, pero depende aun más de las características de diseño propias de la edificación como lo son la estructura y los materiales (Ruiz-Sibaja *et al.*, 2023). Por lo anterior es que cada municipio en México está facultado para emitir reglamentos de diseño sismorresistente, sin embargo, no todos poseen reglamentos basados en resultados de investigaciones realizadas en ellos (Tapia-Hernández et al., 2017).

Existe una carencia en la cultura de prevención respecto a la actividad sísmica en Tabasco, así como una falta de herramientas y criterios que sean útiles durante el diseño de las viviendas

para que se garantice que puedan resistir los sismos. Actualmente el diseño sismorresistente que involucra el uso de espectros de peligro sísmico es empleado únicamente para infraestructuras como hospitales, escuelas, oficinas y similares, y no para las viviendas.

En un estado donde hay 2324 localidades rurales y 148 localidades urbanas (INEGI, 2020), resulta preocupante que gran parte de las viviendas no posean un diseño sismorresistente, lo que puede conllevar a severas afectaciones ante un evento sísmico, este es el caso de la zona de interés en este estudio la cual es Villa Jalupa en el municipio de Jalpa de Méndez, en el estado de Tabasco, México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

1.4 Hipótesis

Un estudio más detallado y enfocado en el peligro sísmico de Tabasco revelará que la demanda sísmica municipal varía entre sus localidades, mostrando que Jalpa de Méndez presenta un peligro sísmico bajo en comparación con los otros municipios del estado. Se anticipa que el espectro medio condicional generará aceleraciones menores que el espectro de peligro uniforme, ya que este no considera la distribución uniforme del peligro sísmico y varía en función del periodo condicionante. Además, se postula que, al integrar los efectos de sitio en los mapas y espectros probabilísticos, los valores de aceleración aumentarán, dado que la presencia de material sedimentario reduce la velocidad de las ondas sísmicas y provoca amplificación.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

1.5 Justificación

Ninguna obra ingenieril construida sobre un sitio donde existe la posibilidad de que ocurran movimientos sísmicos está exenta de que la misma pueda sufrir daños, o incluso un colapso, una vez se dé la detonación de dichos eventos. No obstante, cuando se conoce bien la zona y se evalúa de la manera adecuada antes de comenzar una construcción, se pueden prevenir o mitigar los problemas relacionados con la actividad sísmica. Es decir, considerar el peligro sísmico en la construcción puede mitigar, o incluso prevenir, daños ante un evento sísmico y asegurar la integridad de la estructura y las personas en ella. Entre las herramientas utilizadas para el diseño sísmico resistente de las estructuras están los espectros de peligro sísmico.

En este trabajo se obtendrá el espectro medio condicional, el cual se basa en el espectro de peligro uniforme, ya que es el más acertado en cuanto a las aceleraciones máximas esperadas manteniéndose más apegado a la realidad, lo cual hará que los recursos planeados al establecer un plan de acción de diseño sean los justos para prevenir daños.

Así como el espectro podrá ser útil para construcción de futuras estructuras también podrá aplicarse a edificaciones preexistentes mediante la realización de una evaluación de vulnerabilidad la población podría trazar un plan de prevención ante las aceleraciones máximas que pudieran presentar en su zona, así como también podrían realizar una actualización de diseño de las estructuras, reduciendo de esta manera la vulnerabilidad sísmica del área. De esta manera, el espectro medio condicional servirá como criterio para la toma de decisiones para las autoridades correspondientes en el ámbito de construcción y protección civil.

El trabajo realizado no solo ayudará en el ámbito ingenieril, sino que también podría ser útil para concientizar a la población sobre el peligro sísmico y la importancia de tomarlo en cuenta para salvaguardar su patrimonio económico y su integridad física ante un evento sísmico.

1.6 Antecedentes

Gran parte del desarrollo del peligro sísmico se debe a la interacción entre Allin Cornell y Luis Esteva (McGuire, 2007), siendo este último miembro de la Universidad Nacional Autónoma de México. A partir de allí, se han realizado múltiples estudios de peligro sísmico en diferentes partes de México que entregan como resultado espectros de peligro sísmico o mapas de peligro sísmico. La mayoría de estos estudios están centrados en la parte oeste del país, dado que allí se encuentra una zona de subducción que provoca constantemente sismos de magnitud considerable. Pocos estudios sobre peligro sísmico que se enfoquen en la parte sureste del país han sido desarrollados.

En el año 2019 se presenta un trabajo sobre peligro sísmico en el estado de Chiapas (Rodríguez-Lomelí & García-Mayordomo, 2019), el cual surge debido a la necesidad de conocer más a detalle el peligro sísmico en el estado al estar situado en la conjunción de tres placas tectónicas: Norteamérica, Cocos y Caribe. El enfocarse a una región más pequeña permitió lograr mejores resultados, esto se refleja en la caracterización de las fuentes sismogénicas, donde encontraron un mayor número de zonas que las reportadas en esa región en el trabajo de Zúñiga *et al.* (2017). Al final de ese trabajo se concluye que la sismicidad de Chiapas se debe principalmente a las fuentes asociadas a las fuentes de subducción y a los sistemas de fallas presentes en la zona, así como también se nota que los valores de los espectros son mayores de los que refleja el programa PRODISIS para el estado.

Alamilla *et al.* (2021) desarrolla una evaluación del peligro sísmico probabilístico en la región del Golfo de México. En dicho trabajo se menciona que para zonas menos pobladas el desarrollo de estas metodologías se complica más dado que frecuentemente son estas las zonas donde hay menor disponibilidad de instrumentación para el registro de la sismicidad, lo cual se traduce en un catálogo incompleto y representa una problemática importante porque un paso fundamental en la evaluación del peligro sísmico es la parametrización de las fuentes sismogénicas a partir del catálogo sísmico. Aunado a lo anterior, los estudios de enfoque geológico y geofísico son de gran ayuda pues ayudan a conocer mejor la zona de estudio y se obtienen resultados más realistas de la evaluación del peligro sísmico.

Finalmente, se analiza un estudio sobre el diseño de las estructuras contemplando espectros sísmicos (Ramos-Sánchez *et al.*, 2024). En este trabajo se menciona que los estudios geofísicos ayudan a desarrollar evaluaciones de peligro sísmico dado que permiten conocer el compartimiento del suelo ante un sismo a partir de propiedades como las velocidades de propagación y el período fundamental, así como la estratificación del subsuelo somero, lo cual da paso a contemplar los efectos de sitio en el cálculo del peligro sísmico. Se concluye que el desarrollar espectros que contemplen los efectos de sitio mediante estudios geofísicos o geotécnicos ayuda a reducir los costos de la estructura sin comprometer su seguridad.

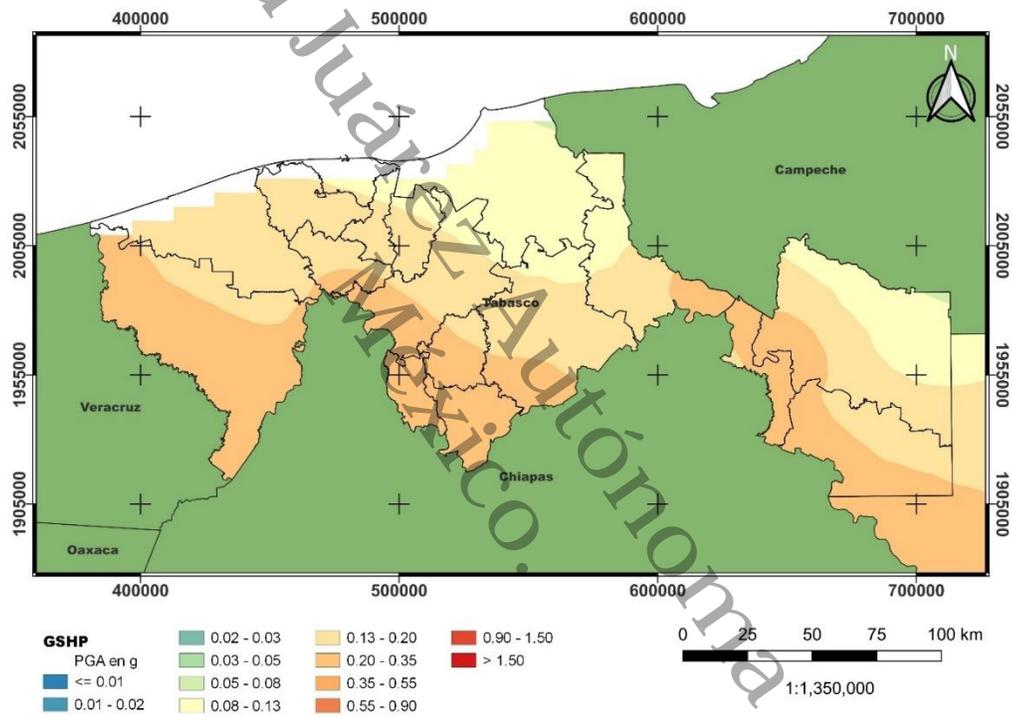


Figura 1 Valores de PGA con 10% de probabilidad de excedencia en un periodo de exposición de 50 años. Elaborado por los autores a partir de datos del GSHP.

Existe un Mapa de Peligro Sísmico Global (*GSHP* por sus siglas en inglés) desarrollado por *Global Earthquake Model Foundation* en colaboración con múltiples instituciones de diversas partes del mundo, de esta manera se construyó un mapa integrando múltiples modelos regionales y nacionales de diversas partes del mundo. El mapa muestra los valores de aceleración máxima del suelo (*PGA* por sus siglas en inglés) con 10% de probabilidad de excedencia en un período de

exposición de 50 años considerando condiciones de propagación de roca. La versión más actualizada fue publicada en el 2023 (Johnson *et al.*, 2023). La Figura 1 muestra el *GSHP* resaltando el estado de Tabasco.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Capítulo II: Marco Teórico.

2.1 Sismos

Un sismo es la liberación repentina de energía en el interior de la Tierra debido al movimiento de las placas tectónicas, esta energía viaja en forma de ondas hasta llegar a la superficie provocando el movimiento de esta. Los eventos sísmicos representan una de las manifestaciones más devastadoras de la naturaleza dado que llegan a generar pérdidas humanas y destrucción a la infraestructura en cuestión de minutos (Bonett-Díaz, 2003). El sistema de un sismo consiste en tres partes: plano de ruptura, hipocentro y epicentro. El plano de ruptura o plano de falla es la zona donde los bloques de corteza están en contacto. El hipocentro o foco es el punto donde se produce la liberación de energía y a partir del cual se propagan las ondas. Por último, el epicentro es la proyección del hipocentro en superficie.

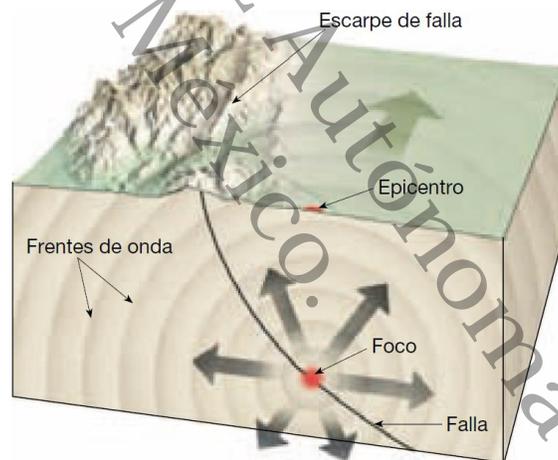


Figura 2 Elementos fundamentales de un sismo. Extraído de Tarbuck y Lutgens.

En un contexto científico las palabras sismo, terremoto y temblor significan lo mismo, sin embargo, comúnmente las personas asocian la palabra terremoto a sismos de gran intensidad y la palabra temblor a sismos de baja intensidad.

2.1.1 Clasificación de los sismos

Los terremotos pueden ser clasificados en superficiales, intermedios y profundos acorde a su profundidad de hipocentro. Los terremotos superficiales ocurren a una profundidad menor a los 70 km, los sismos intermedios ocurren a profundidades entre los 70 y los 300 km, finalmente los sismos profundos ocurren a profundidades mayores a los 300 km. Los sismos de mayor profundidad tienden a generar menos daños puesto que las ondas se atenúan antes de llegar a la superficie debido a las grandes profundidades.

Los sismos también se pueden clasificar con base a la posición donde ocurren con respecto a las placas tectónicas, bajo este criterio se clasifican en: interplaca, intraplaca y corticales (García-de la Huerta, 2023). Esta clasificación consiste básicamente en dos grupos, los sismos que ocurren en la interfase de contacto entre las placas, los cuales son llamadas interplaca, y los sismos que ocurren dentro de una placa, los cuales dependiendo de la profundidad a la que ocurran pueden ser corticales, aquellos que ocurren en la parte más somera de la corteza, y los sismos intraplaca, que son aquellos que ocurren a profundidades intermedias (de 50 y más km dependiendo la zona).

2.1.2 Magnitud e intensidad de un sismo

Dos de los parámetros de un sismo más conocidos y útiles para poder caracterizarlos son la magnitud y la intensidad, además ayudan a poder conceptualizar una idea del tamaño del sismo, así como a comparar los sismos entre sí. La magnitud hace referencia a la cantidad de energía liberada cuando se genera un sismo y es algo cuantificable mientras que la intensidad se refiere a los daños que provoca el sismo por lo cual es algo subjetivo y cualitativo (Fowler, 2005).

La primera escala de magnitud fue implementada en 1935 por C. F. Richter y fue desarrollada para terremotos en el sur de California (Tarbuck & Lutgens, 2005). A partir de allí se desarrollaron diferentes escalas que pudieran ser aplicadas sin importar la posición geográfica donde se detectara el sismo. Todas las escalas de magnitud son logarítmicas y se basan en la medición de la amplitud de las ondas sísmicas; cualquier escala de magnitud tienen una fórmula de la siguiente forma:

$$M = \log_{10} \left(\frac{A}{T} \right) + q(\Delta, h) + a \quad (1)$$

Donde M es la magnitud, A es la amplitud máxima de la onda, T es el periodo de la onda, $q(\Delta, h)$ es una función de corrección que depende de la distancia al epicentro y la profundidad del foco, y a es una constante empírica asociada a otros factores como la localización y características del subsuelo del sitio. Actualmente una de las magnitudes más utilizadas por no depender de la localización geográfica donde se emplee es la magnitud de momento M_w , cuya formula es:

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10} M_0 - 6.0 \quad (2)$$

Donde M_0 es el momento sísmico, el cual es el producto del módulo de corte, el área y el desplazamiento promedio de la falla.

Sin embargo, al estar atadas a la subjetividad y depender tanto de los daños que el terremoto pueda causar como del factor humano, aunque las escalas de intensidad sean un gran referente para la identificación de la gravedad de un terremoto en distintas partes del mundo, estas mismas no son capaces de medir la dimensión real de un sismo por si solas. La Tabla 1 presenta la escala modificada de Mercalli, utilizada para medir la intensidad de un sismo.

Tabla 1. Descripción de la escala modificada de Mercalli, extraído de Tarbuck & Lutgens, 2005.

INTENSIDAD	DESCRIPCIÓN
I	No es percibido, a excepción de unas pocas personas bajo circunstancias que favorecen que sea sentido.
II	Sentido sólo por unas pocas personas en reposo, en especial en pisos superiores de edificios.
III	Sentido con bastante nitidez en los interiores, especialmente en los pisos superiores de edificios, pero muchas personas no lo reconocen como sismo.
IV	Durante el día, sentido en el interior de los edificios por muchas personas, en el exterior por muy pocas. Similar a que un camión pesado haya chocado con el edificio.
V	Sentido por la mayoría de la población y puede despertar a las personas. Se puede observar movimiento en árboles, postes y otros objetos altos.
VI	Sentido por todos, la gente se asusta y sale a la calle. Los muebles pesados se mueven, puede haber casos de paredes caídas o chimeneas dañadas. Poco daño.
VII	Hay daño despreciable a los edificios que cuentan con buen diseño y construcción, daño ligero a moderado en edificios con diseño ordinario y daño considerable en edificios con un diseño y construcción pobre o malo.
VIII	Daño ligero en estructuras con diseño especial, considerable en edificios ordinarios con derrumbamientos parciales. Los edificios con diseño pobre presentan grandes daños, hay caída de chimeneas, columnas, muros, entre otros.
IX	Daño considerable en estructuras especialmente diseñadas, los edificios bien diseñados presentan desplazamiento en sus cimientos, los edificios ordinarios presentan un gran daño y las tuberías subterráneas se rompen. Se abren algunas grietas en el suelo.
X	Algunas estructuras bien construidas de madera son destruidas y la mayoría de las estructuras de albañilería son destruidas. Se abren muchísimas grietas en el suelo.
XI	Quedan de pie muy pocas estructuras, si es que queda alguna. Se destruyen los puentes y hay grandes fisuras en el terreno.
XII	Daño total. Se ven ondas en el suelo y los objetos son lanzados al aire.

2.1.3 Ondas sísmicas

Las ondas sísmicas son la propagación de energía a través del subsuelo desde el punto de ruptura donde se origina el terremoto hasta la superficie, estas ondas van causando una deformación elástica en los medios que atraviesan y eso es lo que produce el movimiento que se percibe en superficie (Kearey *et al.*, 2002). Estas ondas elásticas no solo afectan los medios que atraviesan, sino que también ellas se ven afectadas por los medios en su velocidad de viaje, lo anterior permite que se pueda conocer el interior de la Tierra por medio del estudio de estas ondas. Las ondas elásticas se dividen en dos tipos: de cuerpo y superficiales.

Las ondas de cuerpo deben su nombre al hecho de que viajan a través del interior de la Tierra, estas ondas pueden ser reflejadas y refractadas en las interfases de medios diferentes. Estas ondas a su vez se subdividen en dos tipos: las ondas P y las ondas S. Las ondas P deben su nombre a que son las primeras ondas en arribar y ser detectadas por lo cual se les considera ondas primarias, realizan un movimiento de compresión en la dirección de propagación de la energía. Por otro lado, las ondas S son las ondas secundarias ya que llegan después de las ondas P y realizan un movimiento de corte en dirección perpendicular a la propagación de la energía.

Las ondas superficiales se generan en la superficie de la Tierra y en las capas próximas a superficies, no penetran en profundidad en la Tierra y poseen velocidades mucho menores que las ondas de cuerpo, pero son las que mayor amplitud poseen y las que más daño pueden generar, se subdividen en ondas Rayleigh y ondas Love. Las ondas Rayleigh tienen un movimiento denominado *ground roll* en sentido retrogrado a la dirección de propagación. Por otro lado, las ondas Love tienen un movimiento paralelo a la superficie y perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

2.2 Análisis Probabilístico de Peligro Sísmico (PSHA)

El proceso por el que se evalúan los parámetros de movimiento del suelo de futuros terremotos se llama análisis de peligro sísmico. El enfoque probabilista surge en la década de 1960, a partir del intercambio de ideas que se dio entre Allin Cornell y Luis Esteva (McGuire, 2007). Los pasos para llevar a cabo el enfoque probabilista de este han sido reportados por diversos autores y, aunque las descripciones de cada paso pueden variar, en esencia el enfoque probabilista se puede resumir en cuatro pasos.

El punto de partida del *PSHA* es la identificación y parametrización de las fuentes sismogénicas que tienen influencia en el sitio de interés (Kijko, 2020). Una fuente sismogénica es una estructura tectónica que puede originar sismos, las más comunes son las fallas sin embargo también puede haber otras estructuras que generen sismos, como por ejemplo los volcanes. Se debe definir cómo se tratará la fuente (área, plano, línea, punto), la profundidad de la fuente, el mecanismo de falla y los parámetros de ruptura.

Una vez se tienen definidas las fuentes sismogénicas, se procede a determinar la sismicidad de estas. La sismicidad de la fuente puede quedar descrita mediante su relación frecuencia-magnitud y su distribución de distancias fuente-sitio (Baker, 2013). La relación frecuencia-magnitud es la tasa de ocurrencia de sismos dependiendo de su magnitud y se obtiene a partir de los catálogos sísmicos. La distribución de distancias fuente-sitio es la función de densidad de probabilidad que indica la probabilidad de ocurrencia de un sismo a cualquier distancia de la zona de interés.

Posteriormente, se selecciona un modelo de atenuación, también conocido como modelo de movimiento del suelo o ecuación de predicción de movimiento del suelo (*GMM* y *GMPE* respectivamente, por sus siglas en inglés), el cual permitirá caracterizar el peligro sísmico de forma completa al dar la capacidad de estimar los movimientos de la superficie ante cualquier escenario sísmico (Álvarez, 2021). Los modelos de atenuación son desarrollados a partir de grandes cúmulos de datos de sismicidad que son utilizados para hacer regresiones y establecer una función multivariable que depende de factores como magnitud, distancia, mecanismo focal, entre otros, que calcule los valores de un parámetro de movimiento del suelo.

Para un evento sísmico existen varios parámetros que pueden ser utilizados para describir el comportamiento del suelo, como pueden ser el desplazamiento o la velocidad, uno de los parámetros más utilizados es la *PGA*. Hay modelos que han sido desarrollados y pueden aplicarse para distintos lugares y condiciones, y hay otros modelos que solo aplican en regiones específicas. La selección del modelo se hará según el criterio de la persona que desarrolle el PSHA.

Finalmente, a la información recabada en los pasos anteriores se le integran las incertidumbres asociadas a la localización y atenuación. En la siguiente figura se puede apreciar esta metodología resumida:

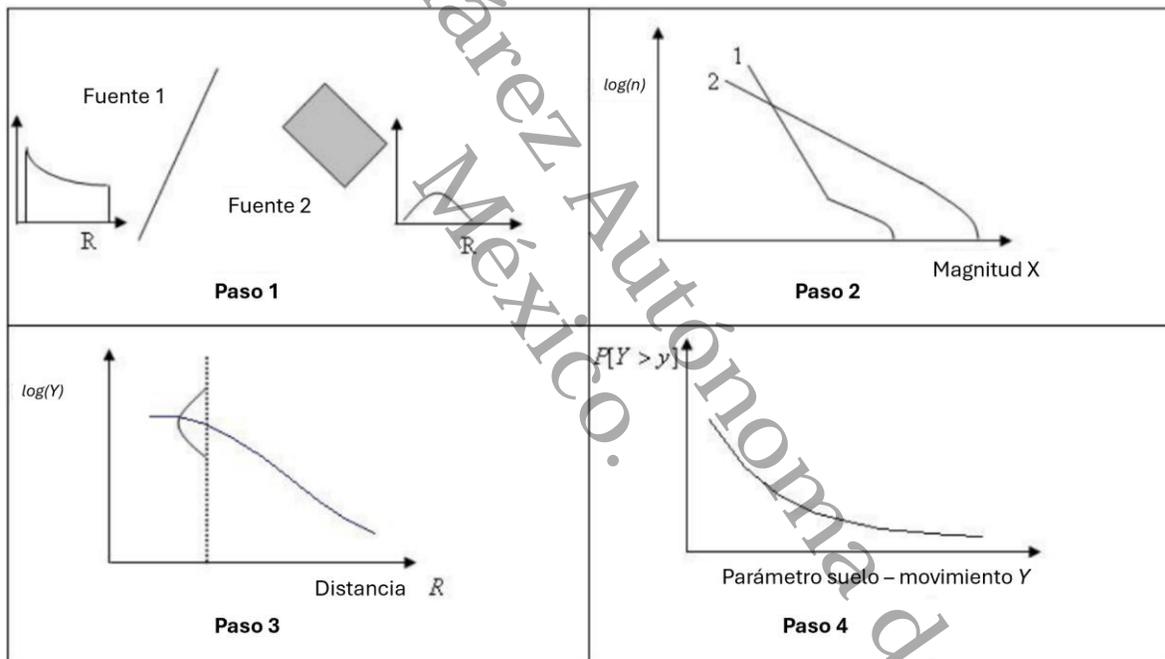


Figura 3 Cuatro pasos para el PSHA, extraído de Kijko, 2020. Paso 1: identificación y parametrización de fuentes sísmicas; paso 2: cálculo de tasas de ocurrencia; paso 3: cálculo de relaciones de atenuación; paso 4: integración de incertidumbres obtenidas.

La metodología clásica para realizar un *PSHA* es la implementada por Cornell-McGuire y fue presentada por Cornell en 1968 para posteriormente ser modificada por McGuire en el 2004 (Kijko, 2020). Esta metodología considera que los modelos de atenuación del suelo dependen únicamente de la magnitud del terremoto y la distancia de este, por lo cual para una ruptura solo

se debe especificar la magnitud y distancia. Conforme ha pasado el tiempo se han presentado múltiples ecuaciones para representar el peligro sísmico, la ecuación 3 calcula la probabilidad de excedencia de una intensidad $P[A > a|t_j]$ en función de la tasa de excedencia de la intensidad a y el periodo de exposición t_j (Torres-Álvarez, 2015).

$$P[A > a|t_j] = 1 - e^{(-v(a)t_j)} \quad (3)$$

El producto que se obtiene de un *PSHA* son las curvas de peligro sísmico, las cuales son gráficas de probabilidad de excedencia anual en función del valor de PGA. A partir de estas curvas se pueden obtener otros productos, los cuales son mapas y espectros de peligro sísmico. Un mapa de peligro sísmico es una representación gráfica que muestra los valores de PGA en un determinado espacio geográfico utilizando escalas de colores. Por otro lado, los espectros de peligro sísmico son gráficas de valores de PGA en función de los períodos de vibración de las estructuras.

2.2.1 Modelos geométricos de fuentes sismogénicas

Existen distintos modelos geométricos para caracterizar las fuentes sísmicas. Dentro de R-CRISIS hay 3 modelos disponibles:

- a) Fuentes de área. Son modeladas como planos con ayuda de un set de vértices que conforman una representación tridimensional.
- b) Fuentes de línea. Modeladas como polilíneas con profundidades constantes o variables.
- c) Fuentes puntuales. Donde las fuentes de grid son un caso particular. Cada punto representa un hipocentro potencial de un sismo.

En este proceso se usaron únicamente las fuentes de área, donde las fuentes sísmicas son modeladas como polígonos definidos por las coordenadas 3D de cada uno de sus vértices. En estas zonas extensas donde se produce actividad sísmica, se permite modelar la sismicidad de manera

más realista ya que considera que los sismos pueden generarse en regiones amplias y no sólo en fallas específicas. A continuación, una representación gráfica de este tipo de fuentes.

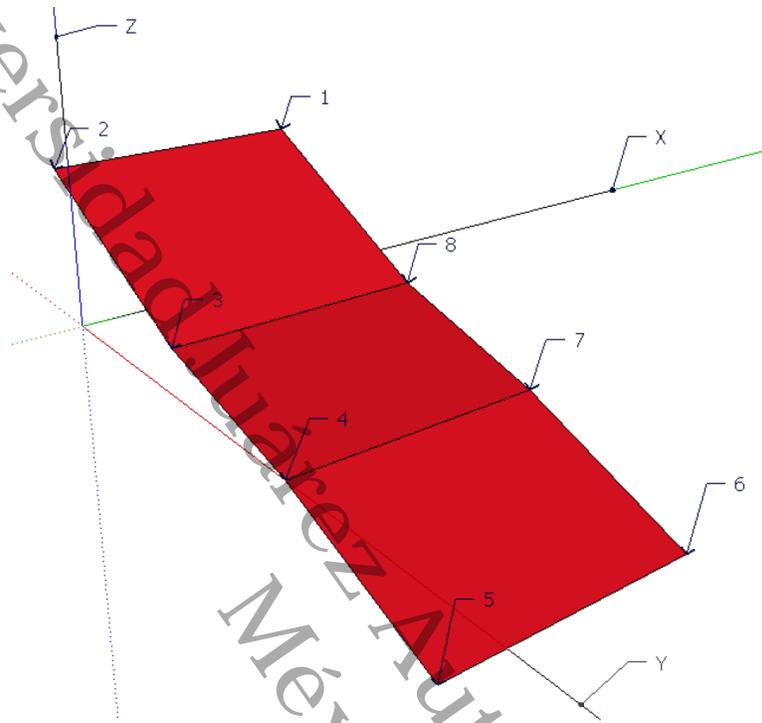


Figura 4 Área fuente con 8 vértices, extraído de Ordaz M. and Salgado-Gálvez M.A. (2020).

2.2.2 Ecuaciones de predicción de movimiento del suelo

Las ecuaciones de predicción de movimiento del suelo, también conocidas como los modelos de atenuación o modelos de movimiento del suelo, son parte fundamental del análisis de peligro sísmico probabilístico, debido a que son expresiones matemáticas definidas en función de los parámetros de un evento sísmico (por ejemplo, la distancia y magnitud del evento). Estas ecuaciones brindan el valor estimado de un parámetro de movimiento de suelo: aceleración máxima, velocidad máxima, desplazamiento máximo, entre otros, siendo uno de los más utilizados la aceleración máxima del suelo en gales.

Para poder construir una *GMPE* se pueden utilizar dos métodos: empírico y teórico. El método empírico es el clásico para construir una *GMPE* y para realizarse requiere de un cúmulo de datos de parámetros sísmicos, incluidos en los catálogos sísmicos disponibles en las diferentes

regiones del mundo. De manera general, la formulación de la GMPE se obtiene mediante una regresión de mínimos cuadrados que puede ser lineal o no lineal.

Las GMPE se desarrollan para ser aplicadas en las regiones de donde se recolectan los datos, sin embargo, cuando se utilizan conjuntos de datos globales o se consideran condiciones que pueden variar como el tipo de fuente sismogénica o el medio de propagación, las GMPE resultantes pueden emplearse en diversas partes del mundo. Ejemplo de lo anterior es la GMPE desarrollada por Zhao *et al.* (2006) y la ecuación de Abrahamson & Silva, (1997), resaltando esta última dado que se enfoca en la sismicidad cortical. Para México se han desarrollado GMPE, para terremotos intraplaca se tiene la ecuación de García *et al.* (2005) y para terremotos interplaca se tiene la ecuación desarrollada por Arroyo *et al.*, (2010).

Schmidt-Díaz (2011), menciona que la predicción empírica del movimiento del suelo parte de la relación existente entre una variable dependiente y varias independientes, las cuales representan las tres contribuciones principales al movimiento sísmico del suelo: la fuente, la propagación y los efectos de sitio. Una expresión ampliamente aceptada para relacionar dichas variables aplicando logaritmos a ambos lados y de forma linealizada es la ecuación 4, donde Y es la variable dependiente, usualmente considerada como la aceleración pico del suelo, aceleración espectral, velocidad espectral o velocidad pico del suelo

$$\ln Y = C_0 + C_m M - C_{LD} \ln D - C_D D + C_S S + C_P P \quad (4)$$

En la ecuación 4 se tiene que las variables independientes son M, magnitud del sismo que generó el registro; D como medida de distancia; S es una variable binaria que representa la geología local del sitio; P representa la incertidumbre en la predicción; C_0 se refiere a la fuente generadora del sismo; C_M es el coeficiente de escala de la magnitud; C_S , relacionado con la condición de suelo y C_P con la incertidumbre de la predicción; C_{LD} y C_D tienen que ver con la atenuación, tanto elástica como inelástica; estos últimos seis son los parámetros a determinar en la regresión.

2.2.3 Espectros de peligro sísmico

Los espectros de peligro sísmico son representaciones gráficas en las cuales se aprecia el valor máximo de intensidad de un parámetro de movimiento del suelo, como puede ser desplazamiento, velocidad o aceleración, en función de distintos períodos estructurales. Por lo anterior, los espectros de peligro sísmico permiten visualizar y comprender de una más fácil el posible comportamiento del suelo ante un sismo. Como consideraciones generales se tiene que los espectros trabajan con aceleraciones máximas, también llamadas aceleraciones espectrales y que estas aceleraciones son normalizadas en unidades de aceleración de la gravedad g . Existen tres tipos de espectros de peligro sísmico: de respuesta, de peligro uniforme (*UHS*) y medio condicional (*CMS*).

El espectro de respuesta debe su nombre a que se obtiene al medir la respuesta máxima de un oscilador de un grado de libertad ante un sismo, esto es, para un solo escenario sísmico cuál sería la máxima aceleración que una estructura con un determinado periodo de vibración pueda presentar. La gráfica se genera a partir de osciladores de diferentes períodos de vibración y calculando su respuesta a partir de un evento determinado, de esta manera, cada sismo genera su propio espectro de respuesta. Algunos métodos para poder calcular el espectro de respuesta son: escalar una forma espectral normalizada, ley de atenuación espectral y uso del espectro de amplitudes de Fourier (Reyes *et al.*, 2002).

Para poder implementar estos espectros de respuesta en el diseño sismorresistente se genera el espectro de diseño. El espectro de diseño es un espectro envolvente que trata de cubrir bajo su curva los picos de aceleraciones máximas de todos los espectros de respuesta disponibles para un área. Este espectro se caracteriza por tener un área de meseta la cual es la aceleración máxima del suelo que se extiende para diferentes períodos estructurales lo cual es su principal diferencia con el resto de los espectros, los cuales en la aceleración máxima presentan una cima o pico. De acuerdo con el Manual de Obras Civiles Diseño por Sismo (CFE, 2015) el espectro de diseño se divide en 4 zonas de acuerdo con los siguientes periodos estructurales: T_a y T_b que son los límites inferior y superior respectivamente de la meseta y T_c que es el período a partir del cual los desplazamientos espectrales tienden correctamente al desplazamiento del terreno. Las ecuaciones para obtener la aceleración espectral en un período T se presentan a continuación.

$$a_0 + (\beta_c - a_0) \frac{T}{T_a} \quad T < T_a \quad (5)$$

$$\beta_c \quad T_a \leq T < T_b \quad (6)$$

$$\beta_c \left(\frac{T_b}{T}\right)^r \quad T_a \leq T < T_b \quad (7)$$

$$\beta_c \left(\frac{T_b}{T}\right)^r P_c \left(\frac{T_c}{T}\right)^2 \quad T_a \leq T < T_b \quad (8)$$

En las ecuaciones 5, 6, 7 y 8, a_0 es la aceleración máxima del terreno, β_c es la máxima ordenada espectral multiplicada por un factor de amortiguamiento, r es un parámetro que controla la caída de las ordenadas espectrales y P_c es un factor que define la variación del espectro en la última zona.

El espectro de respuesta de peligro uniforme o simplemente espectro de peligro uniforme se desarrolla a partir de un *PSHA*, su construcción parte de las curvas de peligro que se obtienen del *PSHA*. Para el *UHS* se definen un período de retorno y una probabilidad de excedencia, esta última se interpreta como la probabilidad de que un valor máximo de aceleración máxima sea excedido durante el período de retorno. Los valores de aceleración espectral que conforman el *UHS* son los puntos en las diferentes curvas de peligro sísmico que tienen la misma tasa de excedencia anual (Gálvez-Díaz, 2023).

Durante el diseño sismorresistente, condicionar la aceleración espectral ayuda a las evaluaciones probabilísticas dado que se relacionan directamente a una curva de peligro del *PSHA* (Baker, 2011). Lo anterior se realiza mediante la selección de sismos que coincidan con el espectro de respuesta objetivo correspondiente, pero para ello se debe encontrar primero el valor de aceleración espectral especificado en un solo período. Este espectro se llama espectro medio condicional (*CMS*) y relaciona el *UHS* con un periodo condicionante y brinda una respuesta más realista de un solo escenario sísmico que el *UHS* (Carlton & Abrahamson, 2014).

El *CMS* mantiene el rigor probabilista del *PSHA* por lo cual permite hacer afirmaciones cuantitativas sobre la probabilidad de observar los niveles de respuesta estructural obtenidos de análisis dinámicos que utilizan este espectro, lo cual no es posible con el *UHS* (Baker, 2011). El *CMS* está relacionado con el *UHS*, por lo cual si se desea obtener el *CMS* primero se tiene que obtener el *UHS*, además para poder desarrollarlo es necesario seleccionar un período condicionante.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

2.3 Fundamento matemático del cálculo del Espectro Medio Condicional

Para poder obtener el espectro medio condicional CMS son necesarias las curvas de peligro sísmico del sitio, las cuales se obtienen mediante del *PSHA*, por lo cual la base de cualquier metodología para calcular el *CMS* es realizar un *PSHA* de la zona de estudio. De forma similar al desarrollo de un *PSHA*, con el *CMS* hay diferentes metodologías para obtenerlo de acuerdo con el autor que se consulte, existiendo similitudes entre estas. A partir de Baker (2011) y Carlton & Abrahamson (2014) se concluye la siguiente serie de pasos para poder obtener un *CMS*.

Lo primero es determinar el período condicionante T^* , su aceleración espectral $Sa_{UHS}(T^*)$ respectiva y los parámetros del escenario sísmico de interés. Dentro de este primer paso se realiza la desagregación del peligro sísmico, este procedimiento consiste en realizar combinaciones aleatorias de magnitud M y distancia R aleatorias e identificar la combinación que tenga mayor aporte en el nivel de peligro sísmico de interés. El valor $Sa_{UHS}(T^*)$ se obtiene del espectro de peligro uniforme (López-Jara, 2016).

El siguiente paso consisten en calcular el valor logarítmico natural medio $\mu(T)$ y la desviación estándar logarítmica natural $\sigma(T)$ para todos los períodos del espectro de respuesta del escenario de control utilizando una *GMPE*. Esto se hace para poder calcular el parámetro $\varepsilon(T^*)$, el cual es el número de desviaciones estándar de diferencia entre el valor espectral logarítmico natural medio del espectro de respuesta del escenario de control $\mu(T^*)$ y $Sa_{UHS}(T^*)$. Para calcular este último parámetro se utiliza la formula que se muestra a continuación.

$$\varepsilon(T^*) = \frac{Sa_{UHS}(T^*) - \mu(T^*)}{\sigma(T^*)} \quad (9)$$

El tercer paso sería el cálculo de ε en todos los períodos por medio de factores de correlación para obtener la media condicional de ε la cual se denomina $\bar{\varepsilon}$ y se obtiene mediante la formula mostrada a continuación.

$$\bar{\varepsilon}(T_i) = \varepsilon(T^*) \times \rho(T_i, T^*) \quad (10)$$

Finalmente, se calcula el logaritmo natural del CMS mediante la siguiente expresión.

$$\text{CMS}_{T^*}(T_i) = \mu(T_i) + \bar{\varepsilon}(T_i) \times \sigma(T_i) \quad (11)$$

Es por este último paso que se denomina espectro medio condicional, dado que es la combinación de los valores medio de épsilon calculados en todos los períodos y las aceleraciones medias espectrales (Carlton & Abrahamson, 2014). Actualmente gracias al avance en la tecnología este procedimiento es desarrollado por medio de las computadoras e incluso hay software que realizan el procedimiento solamente seleccionando los parámetros de ingreso.

2.4 Marco geológico

Con una superficie de 24, 661 km², Tabasco representa el 1.3 % del país (Zavala-Cruz, *et al.*, 2016) y se encuentra dentro de la placa de Norte América, la cual a su vez se encuentra en contacto con la placa del Caribe a lo largo del sistema de fallas Polochic-Motagua, así como también con la placa de Cocos. En la entidad se hacen presentes tres provincias geológicas: la Cuenca de Comalcalco-Sierra de Chiapas, la Sierra de Chiapas y la Cuenca de Macuspana.

La columna estratigráfica comienza en el Jurásico Medio, hasta el final del Cretácico se encuentra compuesta por limolita, arenisca, conglomerado, caliza, lutita y dolomía que se agrupan en diferentes formaciones, destacando las formaciones Sierra Madre y Angostura, ya que a partir de ellas se diferencia la provincia de la Sierra de Chiapas de la provincia de Cuenca de Comalcalco-Sierra de Chiapas. La columna estratigráfica continua con depósitos de lutitas y conglomerados en el Eoceno y Paleoceno (SGM, 2005).

En la Sierra de Chiapas, se tiene que la actividad tectónica en sus fases de plegamiento y dislocación del paquete rocoso han sido de los factores geológicos que han influido en el modelado del relieve de la región, además del relleno de cuencas marinas y lacustres con aportes de materiales terrestres, transportados por una compleja red de corrientes superficiales, en la Llanura Costera.

Tabasco se encuentra dentro de una zona de cuenca sedimentaria, denominada cuencas del sureste, la cual cuenta con material no consolidado del proveniente del Cuaternario de acuerdo con Padilla-Sánchez, R. J. (2007). Dentro de las cuencas del SE, la Cuenca de Comalcalco se tiene desde el Oligoceno hasta el Plioceno y se integra por depósitos de arenisca, lutita y conglomerado en el Oligoceno y Mioceno. Finalmente, en el Plioceno se tiene depósito de arenisca y conglomerado. Por otro lado, La Sierra de Chiapas se compone del Paleoceno hasta el Mioceno de lutita, arenisca, caliza y limolita, destacando un cuerpo intrusivo de composición granodiorítica-diorítica que atraviesa toda la columna, así como un evento volcánico andesítico en el Plioceno, que continuaría en el Cuaternario para dar paso a la formación del volcán Chichonal (SGM, 2005).

La Cuenca de Macuspana comienza a formarse en el Mioceno, su columna estratigráfica hasta finales del Pleistoceno se compone de caliza, lutita, arenisca y conglomerado (SGM, 2006). Las tres provincias fueron cubiertas en el Holoceno por depósitos sedimentarios aluviales, eólicos, palustres y lacustres que se encuentran integrados por grava, limo, arena y arcilla (SGM, 2004).

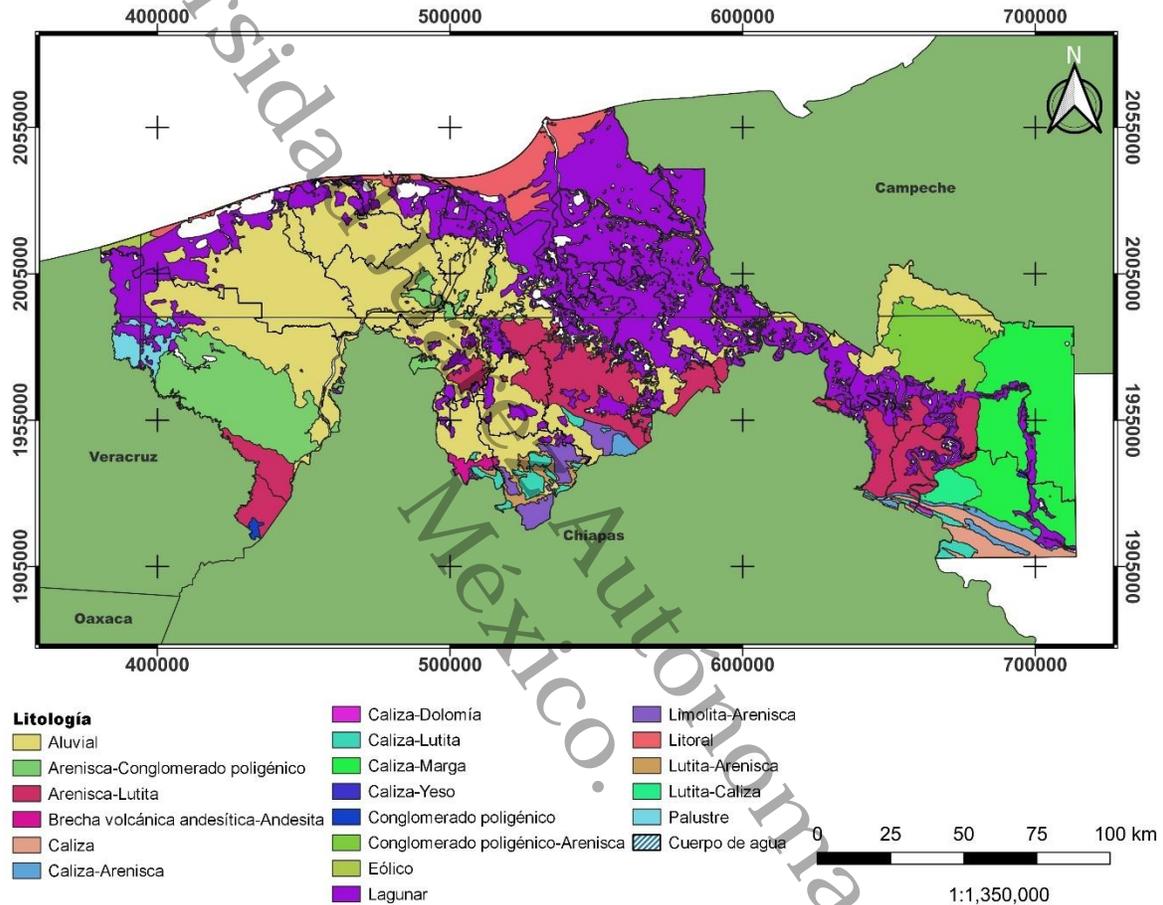


Figura 5 Mapa de la geología de Tabasco, elaborado por los autores a partir de datos del Banco de Datos del SGM.

De manera superficial, hablando en materia de suelos, en el estado de Tabasco se ubican tres ambientes morfogénéticos principales: la Planicie Costera del Golfo Sur (PCGS), la Península de Yucatán y la Sierra de Chiapas y Guatemala. De acuerdo con Zavala, et. al. en su artículo publicado en 2016, dichos ambientes representan el 85.1, 9.0 y 6.0 % del estado y, a su vez, son subdivididos en 12 paisajes geomorfológicos, de los cuales sobresalen las terrazas costeras, las planicies palustres, fluvial activa y fluviodeltaica inactiva en la PCGS. De igual forma, destacan los grupos de suelos Arenosol. Solonchak, Histosol, Fluvisol y Vertisol en las planicies; Alisol. Acrisol y Luvisol en las terrazas costeras, lomeríos y montañas sobre rocas detríticas; Leptosol, Vertisol y Cambisol en paisajes kársticos.

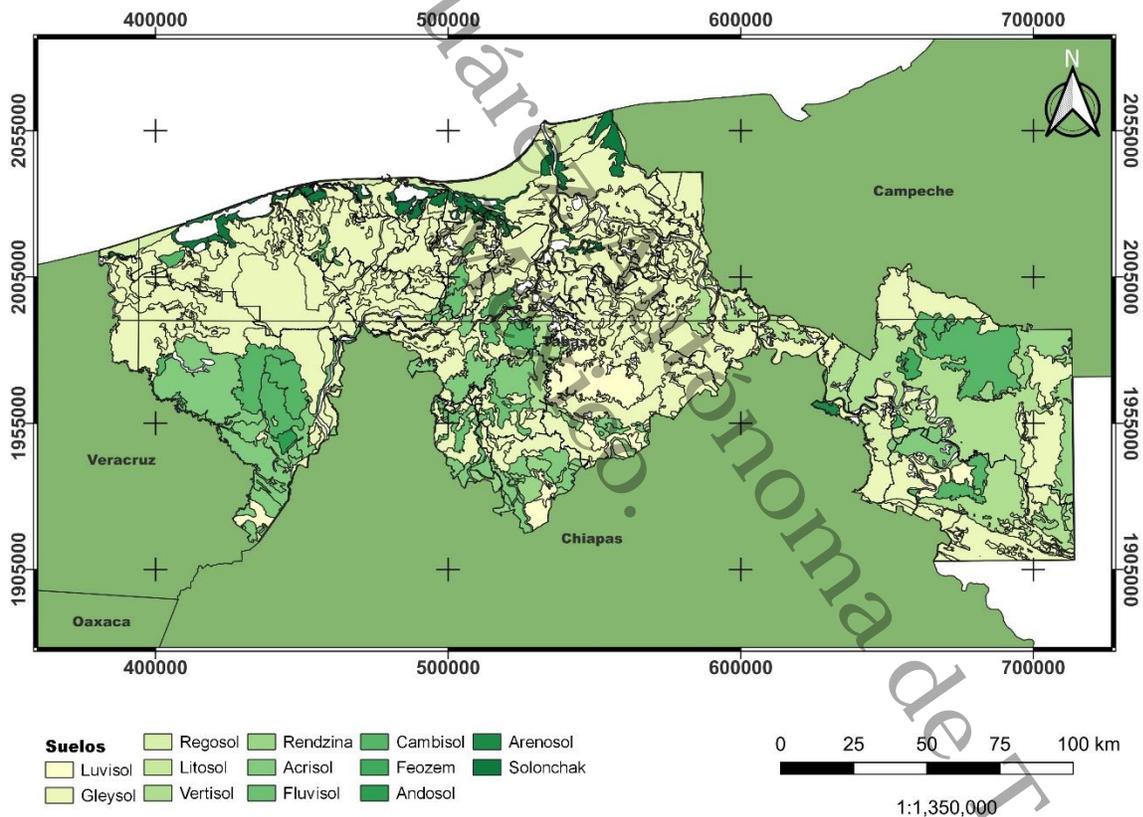


Figura 6 Mapa de la geomorfología de Tabasco, elaborado por los autores a partir de datos del Banco de Datos del SGM.

2.5 Regionalización sísmica

De acuerdo con el mapa de peligro sísmico elaborado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2015), el territorio mexicano está dividido en cuatro grandes zonas, según su grado de peligrosidad: A, B, C y D, de menor a mayor, respectivamente. Con el apoyo de esta regionalización sísmica en conjunto con manuales de obras civiles, es posible lograr calcular valores para diseño óptimo de obras, y así conseguir hacer los proyectos de infraestructuras lo suficientemente seguros para resistir la actividad sísmica. No obstante, se advierte que esta regionalización es aplicable a estructuras construidas en terreno firme, no toma en cuenta el fenómeno de amplificación del movimiento sísmico por efecto de suelos blandos, cuestión que puede ser decisiva para el peligro sísmico en algunos lugares (siendo una caracterización muy regional) (Centro nacional de Prevención de Riesgos [CENAPRED], 2023).

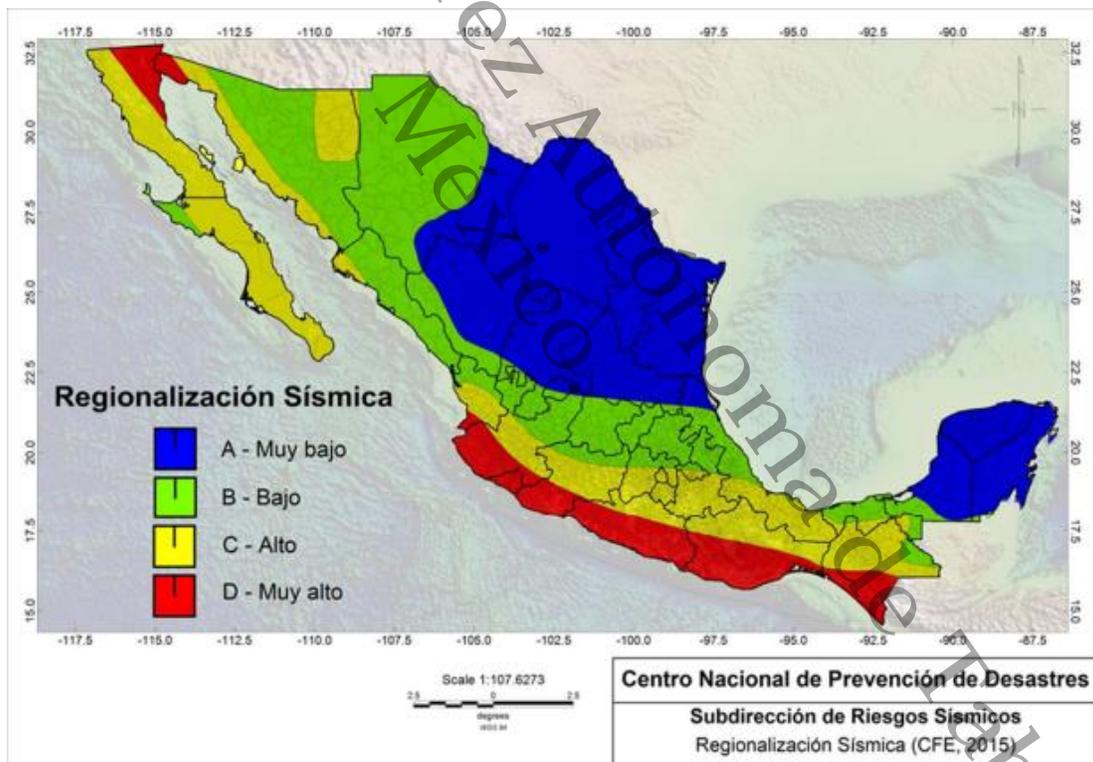


Figura 7 Mapa de regionalización sísmica, extraído de CFE, 2015.

A pesar de no contar con muchas estaciones sísmicas, así como de los pocos estudios enfocados a la sismicidad en el estado, se tienen registros de eventos que han tenido una magnitud

de momento de 4 o superior, la cual ya es perceptible, tanto en el estado como en localizaciones próximas a la entidad. De hecho, en Tabasco se integraron 44 registros de epicentros sísmicos del periodo 1990-2003 publicados por el servicio sismológico nacional (Servicio Geológico Mexicano {SGM} & Secretaría de Comunicaciones Asentamientos y Obras Públicas {SCAOP}, 2013).

En el apartado de anexos, se puede apreciar una tabla que contiene los sismos con epicentros dentro del estado de Tabasco de enero 1990 a agosto de 2024, con magnitudes a partir de 4, información obtenida del Servicio Sismológico Nacional (SSN). Los registros de estos sismos reafirman el hecho de que existe actividad sísmica dentro del estado que generalmente es despreciada. Se puede apreciar que la sismicidad registrada en el lapso utilizado ocurre a profundidades de 4 a 30 km principalmente y se asocia a fuentes corticales, aunque hay 4 eventos que ocurrieron a profundidades de 45, 48, 85 y 140 km de profundidad.

El atlas de peligro del estado de Tabasco proporcionado por el SGM y SCAOP entrega un modelo de isosistas representando la variable de intensidad sísmica en escala Mercalli con base en los datos mencionados provenientes del periodo de 1990-2003. En este modelo de efecto sísmico se puede observar claramente que los valores más altos, entre V y VIII, se presentan en la porción central del estado (incluida la zona de estudio del presente trabajo), sugiriendo que en estas regiones la amplificación de la energía sísmica es alta.

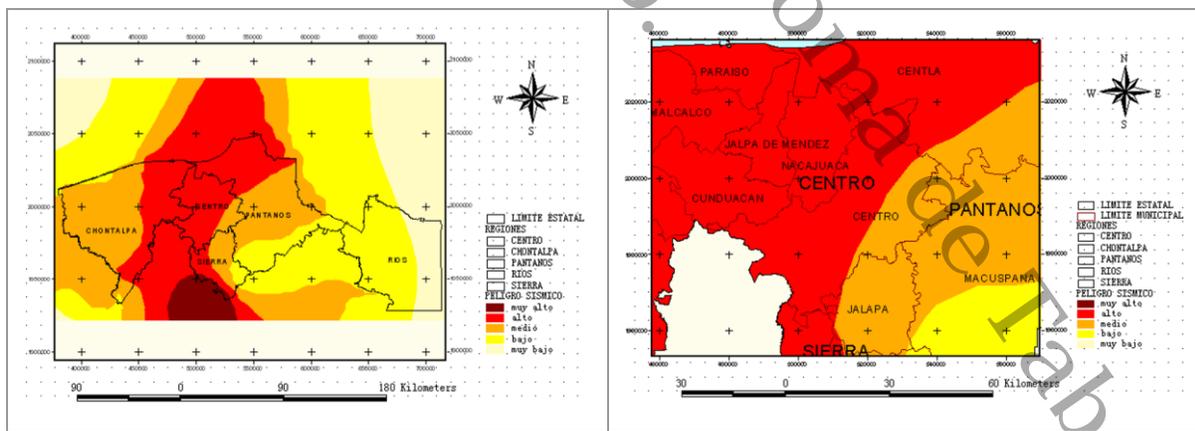


Figura 8 Mapa de peligro sísmico de acuerdo con el atlas de peligro de Tabasco, extraído de SGM & SCAOP, 2013. A la izquierda se puede apreciar el mapa para todo el estado mientras que a la derecha se aprecia un acercamiento al municipio de Jalpa de Méndez.

Dentro de la región Centro se identifican zonas de intensidad alta, de VII de la escala Intensidad de Mercalli Modificada (IMM) de acuerdo con el SGM y SCAOP; únicamente una

aparte del municipio Centro se encuentra en un nivel intermedio. La presencia de materiales sedimentarios no consolidados, de edad reciente, saturados de agua y dispuestos en capas sub horizontales contribuye a ser uno de los factores favorecedores a la disipación de energía sísmica, favoreciendo la propagación de las ondas sísmicas.

El municipio de Jalpa de Méndez se encuentra en una clasificación de zona B con posibles efectos de sitio al poseer un suelo blando. Esta zona, de sismicidad baja, se caracteriza por ser una región en donde no se registran sismos con frecuencia y las amplificaciones de suelo no sobrepasan el 70% de la aceleración de la gravedad (CENAPRED, 2023).

2.5.1 Periodo de vibración fundamental de una estructura

Cuando ocurre un sismo, todo lo que esté sobre el suelo de cualquier sitio que alcancen las ondas se moverá, este movimiento durará todo el sismo y será cíclico. En cuanto a las estructuras, estas se estudian mediante el análisis de sus Modos de Vibración (ya sean movimientos verticales, horizontales, rotacionales o combinaciones de estos). La vibración estructural consta de un movimiento repetitivo oscilatorio en forma de péndulo invertido, el periodo estructural es el tiempo que tarda la edificación en realizar una oscilación o movimiento, una misma edificación puede tener varios periodos estructurales. De los diferentes modos de vibración que tienen las estructuras, el más importante para el análisis estructural es el llamado periodo fundamental por corresponder con las mayores deformaciones y, por lo tanto, con los mayores esfuerzos en sus elementos estructurales (Domínguez, 2014).

El periodo fundamental es una propiedad importante para considerar durante el diseño sismorresistente de la estructura dado que interviene en la respuesta de la estructura durante los sismos; este periodo depende de factores como la rigidez de la estructura, el tipo de material que se utiliza para la construcción, la posición del centro de masa, entre otros, sin embargo, generalmente se utilizan formulas empíricas para poder estimar el periodo fundamental.

$$T = \alpha H^\beta \quad (12)$$

La ecuación 12 (Goel & Chopra, 1997) es la forma básica de las ecuaciones empíricas para determinar el periodo fundamental de una estructura durante su diseño. Dicha fórmula deja el periodo fundamental en función principal de la altura de la edificación, pero sigue considerando otros factores mediante los coeficientes α y β , los cuales dependen del tipo de estructura y de los materiales utilizados, con β teniendo un valor entre 0.5 y 1.

2.5.2 Efectos de sitio

De manera natural, se espera que el movimiento del terreno como consecuencia de un sismo en un punto dado dependa de los parámetros asociados a la fuente sísmica y la atenuación de la misma energía conforme se propague desde la fuente al sitio de interés. Sin embargo, si el sitio de interés no se sitúa sobre roca sólida, el movimiento de referencia tendrá variación, gracias a la amplificación de las ondas como resultado del viaje de estas a través de las interfases irregulares geológicas. A esto se le llama efecto de sitio.

Los efectos de sitio son un factor clave a considerar en el análisis de riesgo sísmico y el diseño sismorresistente de estructuras, este fenómeno complejo mencionado con anterioridad se basa en la modificación de la respuesta sísmica local acorde a las propiedades elásticas de los estratos y su consolidación. A primera instancia se logra relacionar el origen de la amplificación con los contrastes de impedancia (densidad por velocidad de propagación) en el subsuelo, aunque no se debe pasar por alto que la geometría de la superficie del terreno (irregular, por supuesto) también es factor influyente. La conservación del flujo de energía requiere que una onda sísmica que pasa de un medio con velocidad de propagación alta a uno con velocidad más baja aumente su amplitud (observar Figura 9 para la ejemplificación gráfica) (Chávez & Montalva, 2014). Es de esperar que los materiales más superficiales, al ser menos consolidados, tengan velocidades de propagación más lentas.

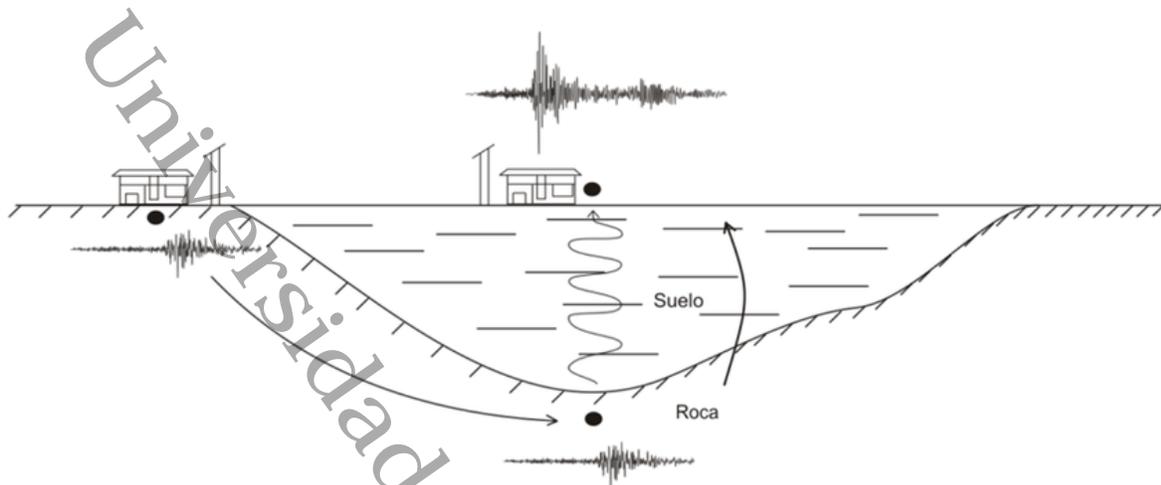


Figura 9 Simulación de un efecto de sitio extraído de Pérez Calderón, 2018. Representación del aumento de amplitud de las ondas en conjunto con la prolongación de la duración de la sacudida sísmica, modificando su espectro de frecuencia al atravesar suelos blandos.

2.5.3 Parámetro V_{s30}

Existe un parámetro del suelo que se basa en el valor promedio de la velocidad de propagación de las ondas en corte en los primeros 30 m del subsuelo, dicho parámetro se llama V_{s30} y es común que sea utilizado para clasificar el tipo de suelo. El programa Nacional de Reducción de la Amenaza Sísmica (NEHRP, por sus siglas en inglés) utiliza la velocidad de onda de corte V_{s30} para definir la clasificación de sitio y recomienda subdividir esta clasificación para el perfil de velocidad de un sitio específico. Si bien, la amplificación de las ondas sísmicas es un fenómeno complejo que depende de varios factores, el V_{s30} resulta de gran ayuda cuando se utiliza como índice para caracterizar la amplificación del suelo y con ello clasificar sitios con distinta demanda sísmica. Este procedimiento es una primera aproximación para una estimación de los efectos de sitio que se puede obtener mediante diferentes técnicas (Eraso, 2015).

Tabla 2 Definición de clases de sitios con base a V_{s30} por el NEHRP.

CLASIFICACIÓN	VELOCIDAD PROMEDIO DE V_{s30} (m/s)	ESPECIFICACIONES
A	$V_{s30} > 1500$	Roca sólida
B	$760 \leq V_{s30} \leq 1500$	Roca
C	$360 \leq V_{s30} \leq 760$	Suelos muy densos o roca suave
D	$180 \leq V_{s30} \leq 360$	Suelo rígido
E	$V_{s30} < 180$	Suelo
F	$V_{s30} < 180$	Suelo que quiere una evaluación específica del sitio

El V_{s30} está relacionado a la consolidación del material que compone el suelo, valores bajos indicarán materiales sueltos mientras que valores altos indicarán materiales más compactos, este cambio en el tipo de material es lo que genera una amplificación de las ondas. Al ser un parámetro relacionado con la amplificación sísmica que experimentan las ondas al llegar a la superficie, resulta útil como primer acercamiento para un futuro análisis de riesgo sísmico o, en este caso, brinda un primer acercamiento a la zona de estudio para tener a consideración al momento de tomar datos en la zona e interpretar los condicionantes que se encuentran en ella.

2.5.4 Factores de amplificación

Existen diferentes metodologías para considerar el efecto de sitio en el PSHA, una de ellas es la presentada por Chiou & Youngs (2014) la cual considera las amplificaciones de los movimientos del suelo durante el cálculo del PSHA a partir de conocer los valores de V_{s30} en cada uno de los puntos donde se va a calcular el peligro sísmico y conocer el valor de V_{s30} del estrato rocoso en el área de interés. Los factores de amplificación son componentes de los modelos de atenuación del suelo los cuales ajustan el movimiento del suelo predicho en roca de acuerdo con las condiciones del suelo.

El software R-CRISIS utiliza los coeficientes del modelo de respuesta del sitio publicados en dicho trabajo para calcular un factor de amplificación. La ecuación 13 es la que utiliza R-CRISIS para contemplar los efectos de sitio en el PSHA mediante un *grid* con los valores de V_{s30} , donde y_{ref} es la amplitud del movimiento del suelo en roca, y_{se} es la intensidad del movimiento del suelo contemplando efectos de sitio y AF es el factor de amplificación.

$$y_{se} = y_{ref} \cdot e^{AF} \quad (13)$$

Capítulo III: Metodología

3.1 Síntesis de metodología

El proyecto se divide en tres etapas: *PSHA* para Tabasco, análisis de los valores de V_{s30} en el área de interés y cálculo de los espectros finales. A continuación, se describen cada uno de los pasos que se realizaron para poder llevar a cabo cada etapa.

1. Revisión de literatura precedente: búsqueda de antecedentes referentes a estudios de peligro sísmico próximos al área de estudio. Como delimitación de la búsqueda de información, esta fue enfocada al sureste mexicano.
2. Elaboración de mapa de peligro sísmico para Tabasco: con la información recabada se realizará un mapa de peligro sísmico de Tabasco en el *software* R-CRISIS.
3. Obtener un espectro de peligro uniforme definido para el punto de estudio en Jalpa de Méndez: el *software* R-CRISIS brinda la posibilidad de obtener el *UHS* para un punto seleccionado en el mapa una vez se cuenta con un mapa de peligro sísmico para la zona de interés. Este espectro cambiará su forma con base a la ecuación de movimiento del suelo que se seleccione y el tipo de suelo, por lo cual la selección de estos parámetros se llevará a cabo en primera instancia considerando el medio de propagación como roca.
4. Análisis de los valores de V_{s30} mediante la base de datos del *USGS*: el Servicio Geológico de los Estados Unidos (*USGS* por sus siglas en inglés) brinda una base de valores de V_{s30} a nivel global. Dicha base se encuentra en formato de *grid* y se le extrajo un *grid* que abarcaba el área del estado de Tabasco.
5. Consideración de los efectos de sitio: el programa R-CRISIS brinda la opción de integrar los efectos de sitio mediante los valores de V_{s30} .
6. Determinación del periodo condicionante: Para poder calcular el *CMS* se necesita seleccionar un período de interés o periodo condicionante, se ha decidido tomar el periodo estructural que presentaba mayores aceleraciones tras integrar los efectos de sitio.

7. Desagregación del peligro sísmico: se realizaron combinaciones de magnitud y distancias epicentrales en búsqueda del escenario sísmico que tenga mayor contribución al peligro sísmico, mismo que se utiliza en el cómputo del *CMS*
8. Compueto del *CMS*: por medio de R-CRISIS se obtuvieron dos *CMS*, uno a partir del *UHS* que considera el medio de propagación como roca y el otro a partir del *UHS* que contempla efectos de sitio tomando el medio de propagación como suelo.
9. Comparación de los espectros: esto se hizo con la finalidad de poder apreciar con mayor facilidad las diferencias en las aceleraciones que presenta cada espectro.

México.

Autónoma de Tabasco.

3.2 Zona de estudio

El área de estudio es el poblado de Villa Jalupa, localizado en el municipio de Jalpa de Méndez, en el estado de Tabasco, la localización se puede apreciar en la Figura 10. El *PSHA* se realiza para toda el área de Tabasco por medio de un *grid*, por lo cual los resultados de este (curvas de excedencia y espectros probabilísticos) se obtendrán de manera puntual. Debido a lo anterior, fue necesario seleccionar una localización dentro de Villa Jalupa para obtener los espectros probabilísticos que se desean. La coordenada UTM utilizada fue 15Q X= 495,166.70 m E Y= 2,005,440.09 m N.

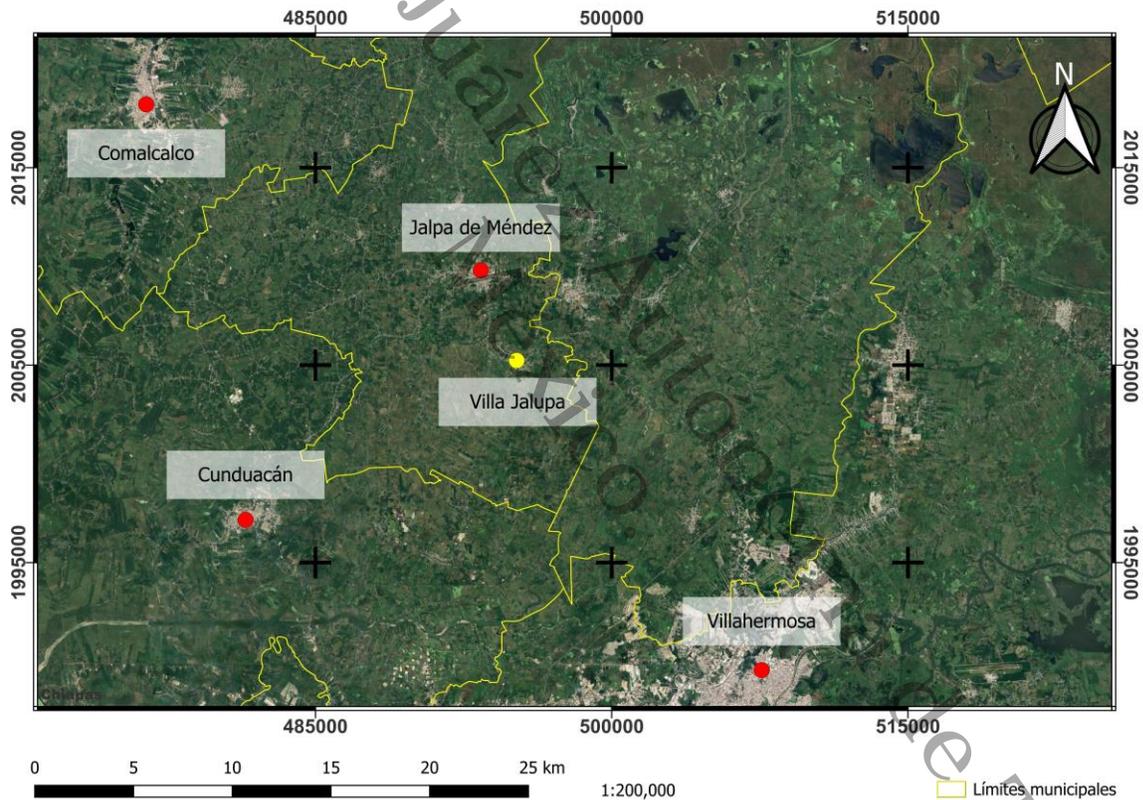


Figura 10 Mapa de la localización de la zona de estudio. El punto en amarillo representa la coordenada que se utilizó para los espectros.

3.3 PSHA para Tabasco

El *PSHA* se desarrolló en R-CRISIS, el cual es un *software* ampliamente usado para realizar estos estudios. El programa fue desarrollado en 1986 por Mario Ordaz bajo el nombre de CRISIS y ha recibido múltiples actualizaciones, siendo la versión de 2017 la más reciente (Ordaz *et al.*, 2021). Previo a comenzar a trabajar propiamente el *PSHA* el programa permite cargar mapas que sirven de referencia para la ubicación geográfica de los resultados. Así que se añadió un mapa de la división municipal de Tabasco. También, se delimito un *grid* que cubriera el estado de Tabasco en el cual se calculará el peligro sísmico en cada uno de los puntos.

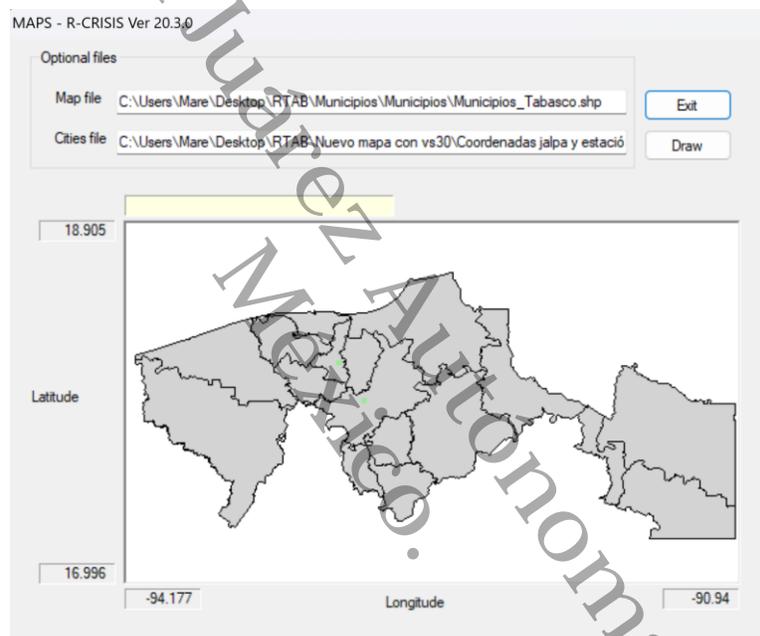


Figura 11 Ventana del programa R-CRISIS para añadir mapas de referencia. Se puede apreciar el archivo shapefile del mapa de división municipal de Tabasco.

El primer paso para desarrollar propiamente el *PSHA* es definir las zonas sismogénicas que afectan el lugar de interés. Las fuentes sismogénicas contempladas en este trabajo fueron brindadas por la asesora de este, todas dentro de la categoría de área y se muestran en la Figura 12. Las especificaciones de sus parámetros de sismicidad se pueden encontrar dentro el apartado de anexos, donde se incluyen magnitud mínima, magnitud máxima, coeficiente β , entre otros parámetros que definen la sismicidad.

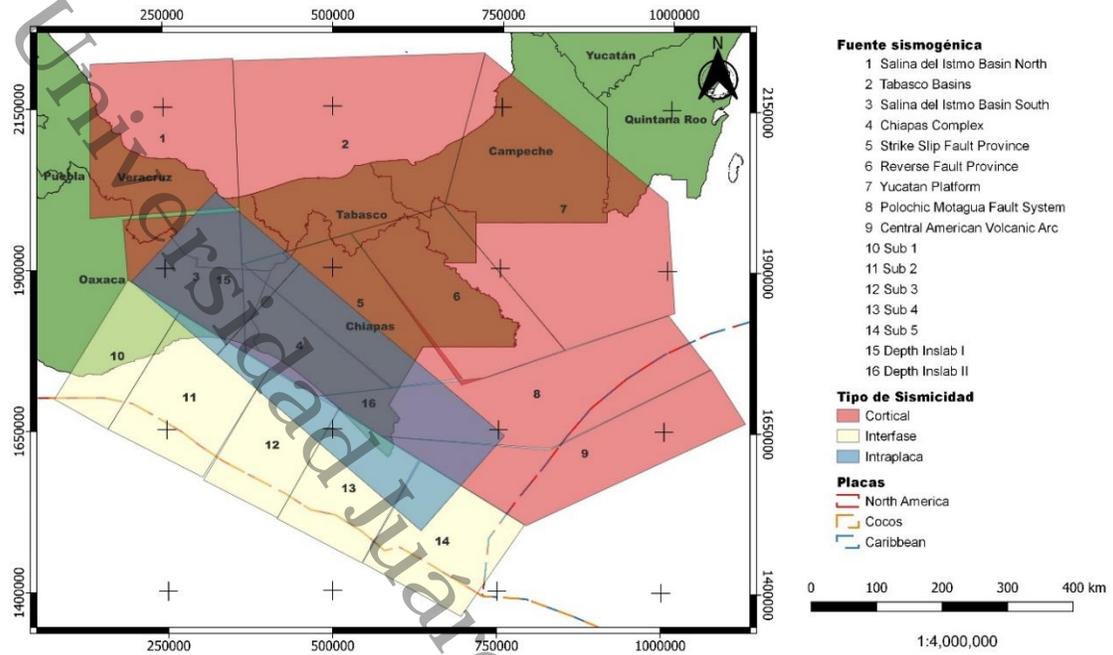


Figura 12 Fuentes sismogénicas empleadas en el PSHA de Tabasco. Elaborado por los autores. Se puede apreciar el tipo de sismicidad de la fuente así como los límites de placas.

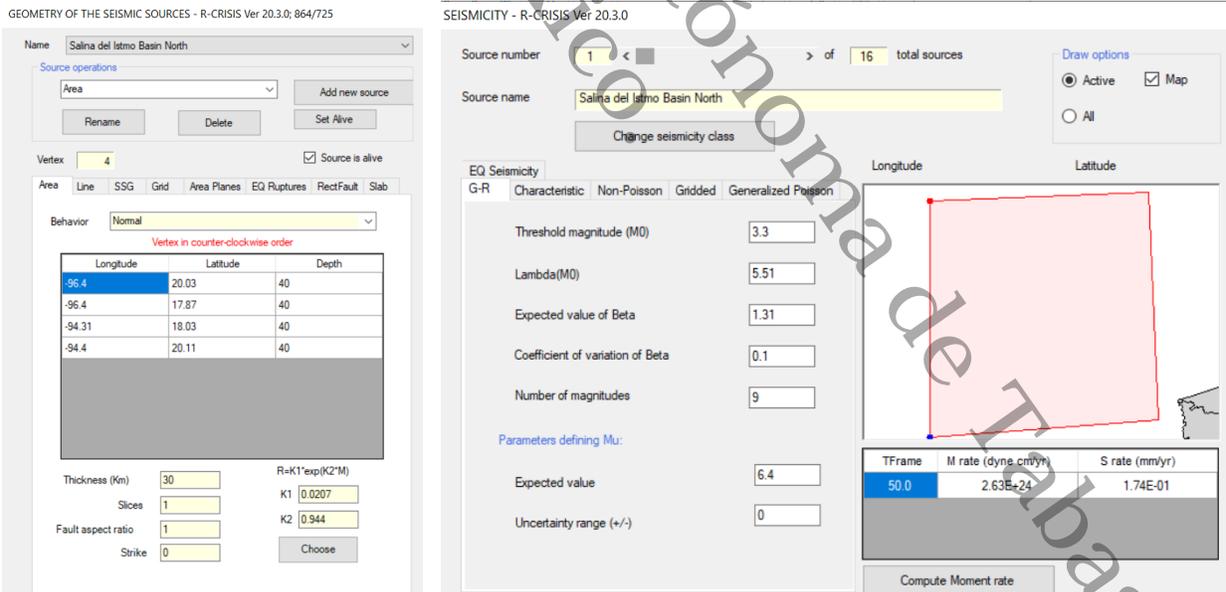


Figura 13 Definición de la geometría (ventana izquierda) y los parámetros sísmicos (ventana derecha) de las fuentes sísmicas en R-CRISIS.

El programa calcula las aceleraciones del suelo en función del período de vibración, para lo cual se deben definir una serie de períodos estructurales, los periodos utilizados en este trabajo se encuentran en la Tabla 3. Para cada periodo se calcula su respectiva ordenada espectral, dichas ordenadas son el conjunto de aceleraciones del suelo calculadas para cada período estructural y con las cuales se forma el *UHS*. Por defecto, el programa calcula las aceleraciones en gales (gal), cuyo equivalente son los cm/s^2 . Para este trabajo se utilizó un total de 12 ordenadas espectrales, con periodos estructurales que van de 0.01 a 3 s. Dándole mayor importancia a los periodos bajos, puesto que son las asociadas a estructuras de baja altura. Para poder definir las ordenadas espectrales se necesitan establecer niveles de intensidad, esto es, un intervalo de aceleraciones dentro de la cual debe estar contenida la aceleración calculada. Los valores límites fueron definidos con base al manual de R-CRISIS.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Tabla 3 Periodos estructurales utilizados para las ordenadas espectrales.

PERIODO ESTRUCTURAL	LÍMITE INFERIOR DE NIVEL DE INTENSIDAD	LÍMITE SUPERIOR DE NIVEL DE INTENSIDAD
0.01	1	2500
0.05		
0.1		
0.15		
0.25		
0.35		
0.5	1	1500
0.75		
1	1	1500
1.5		
2		
3	1	1000

Posteriormente se procedió a asignar las relaciones de atenuación, es decir, seleccionar las *GMPE* acorde a la sismicidad de la fuente sismogénica. El *software* brinda una amplia variedad de *GMPE* para poder seleccionar, con base en la revisión bibliográfica realizados en áreas próximas al estado, se seleccionaron tres relaciones de atenuación: para sismos corticales se utilizó Zhao *et al.*, 2006, para los de clasificación interplaca se hizo uso de Arroyo *et al.*, 2010 y para los terremotos intraplaca se tomó García *et al.*, 2005. Se empleó este conjunto de *GMPE* dado que brindaban un espectro con una figura más acorde a lo esperado, además que las ecuaciones para sismicidad intraplaca e interplaca fueron desarrollados con base de datos de México.

Finalmente se seleccionaron los parámetros globales, dentro de los que se incluyen la distancia máxima de integración, el período de exposición y el período de retorno. De acuerdo con

el Manual de Diseño de Obras Civiles (MDOC) (CFE, 2015) los espectros probabilistas se deben realizar con períodos de retorno de 2475 años, por otro lado, se encontraron trabajos donde se manejaban períodos de retorno de 475 años (Chávez-López & Bojórquez-Mora, 2016; Buenrostro *et al.*, 2021; Zamudio-Zavala, *et al.*, 2021). El resultado de esta etapa fueron 12 mapas de peligro sísmico en términos de *PGA* para cada período estructural, así como el *UHS* y la curva de probabilidad de excedencia para punto del *grid*, todo lo anterior para cada periodo de retorno.

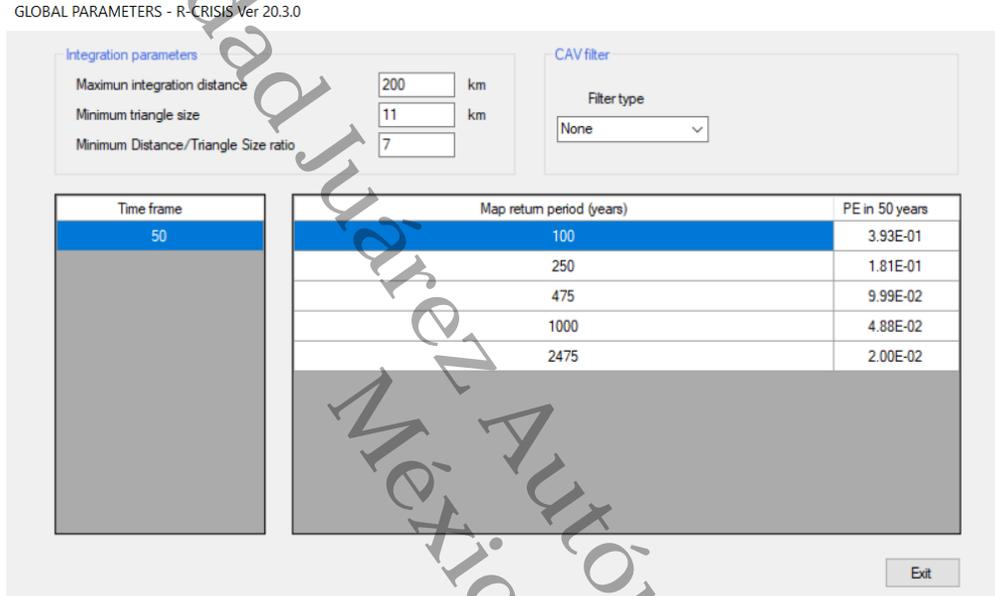


Figura 14 Ventana para definir los parámetros globales en el programa R-CRISIS. En esta sección se introduce el periodo de exposición, se puede trabajar con múltiples periodos de exposición y de retorno.

3.4 Análisis de los valores de V_{s30} en Tabasco

Para poder considerar los efectos de sitio en el cálculo de los espectros se optó por utilizar el parámetro V_{s30} como indicador de las amplificaciones de las ondas sísmicas. El Servicio Geológico de los Estados Unidos (*USGS*, por sus siglas en inglés) tiene disponible en su página web un *grid* que contiene los valores de V_{s30} a escala global con una resolución de 0.0083 grados. Este mapa fue hecho a través de una aproximación de los valores de V_{s30} por medio de las pendientes topográficas gracias a la disponibilidad de modelos de elevación digital en muchas partes del planeta, además de que se integraron mapas de V_{s30} regionales obtenidos a partir de estudios realizados por el *USGS* y otras instituciones (Heath *et al.*, 2020).

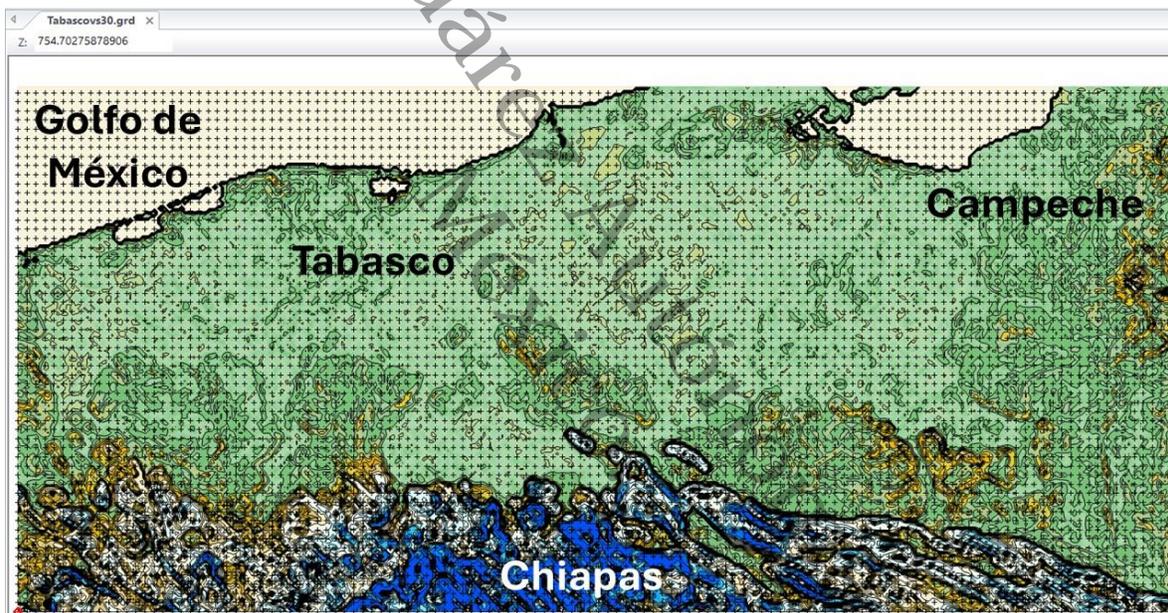


Figura 15 Visualización del *grid* recortado en el software *Surfer 16*. El *grid* cubre toda la superficie de Tabasco y parte de los estados que colindan con él.

Dado que el mapa es a escala global fue necesario realizar un recorte del *grid* para poder visualizar correctamente la información. Lo anterior se realizó en el software *Surfer 16* mediante la herramienta de extracción de *grid*, generando así un *grid* que contenía todos los valores de V_{s30} disponibles para el estado de Tabasco. Posteriormente este *grid* fue añadido a un proyecto en *QGIS* donde se configuró para poder ser visualizado con una escala de colores mediante intervalos,

obteniendo el mapa que se aprecia en la Figura 16. Se utilizó rango de valores de 180 a 900 m/s, mientras que los intervalos van de 200 a 800 m/s esto tomando en cuenta la clasificación de la *NEHRP*.

Con base al mapa de V_{s30} para Tabasco se seleccionó un valor de V_{s30} entre 200 y 300 m/s para ser considerado en la *GMPE* de Zhao *et al.*, 2006, ya que R-CRISIS brinda la posibilidad de seleccionar el tipo de suelo presente en el área de interés. De acuerdo con la clasificación de suelos de *NEHRP* el rango seleccionado de V_{s30} correspondería a un suelo tipo D. El *grid* extraído también fue utilizado en la ventana de efectos de sitio de R-CRISIS, donde se puede añadir un *grid* de V_{s30} para calcular los factores de amplificación con base a la fórmula de Chiou & Youngs (2014).

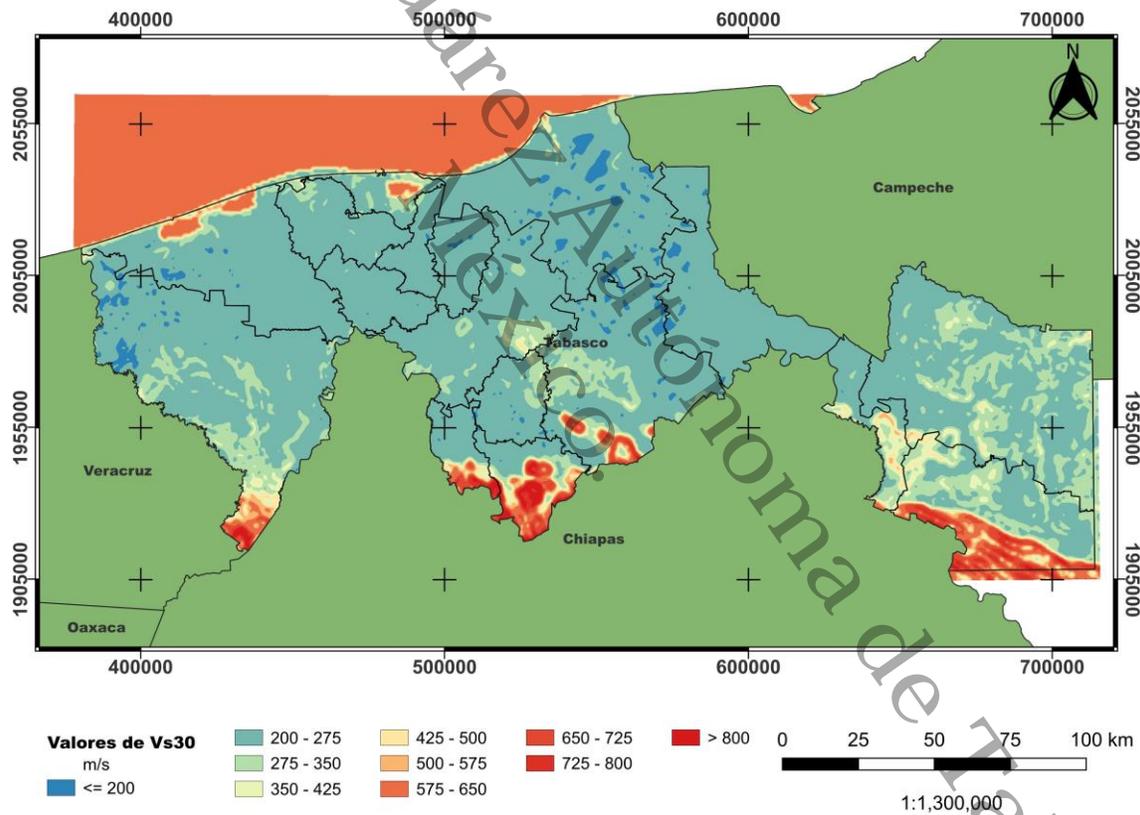


Figura 16 Mapa de V_{s30} para Tabasco. Se puede apreciar que predominan valores entre 200 y 275 m/s.

Se calcularon dos *UHS* con las mismas coordenadas para Jalpa de Méndez, que consideran los efectos de sitio: el primero haciendo el cambio a la *GMPE* de Zhao *et al.* (2006)

seleccionando un tipo de suelo D y el segundo mediante la ventana de efectos de sitio. Solamente se exportaron como *grids* los mapas de aceleraciones generados en el proyecto con la malla de V_{s30} para posteriormente añadirlos a QGIS.

3.5 Cálculo de los espectros finales

Se seleccionó como periodo condicionante para el *CMS* el periodo estructural de 0.15 s dado que es el periodo donde se aprecian las mayores valores de aceleración en los mapas, así como también en este periodo el *UHS* en roca alcanza su máximo. Lo siguiente fue realizar la desagregación del peligro sísmico para identificar el escenario de mayor contribución al mismo. El *software* R-CRISIS posee un módulo donde se puede realizar el proceso de desagregación, dicho módulo se puede apreciar en la Figura 17. R-CRISIS calcula la desagregación para cada periodo estructural por lo cual se seleccionó el periodo de interés 0.15 s.

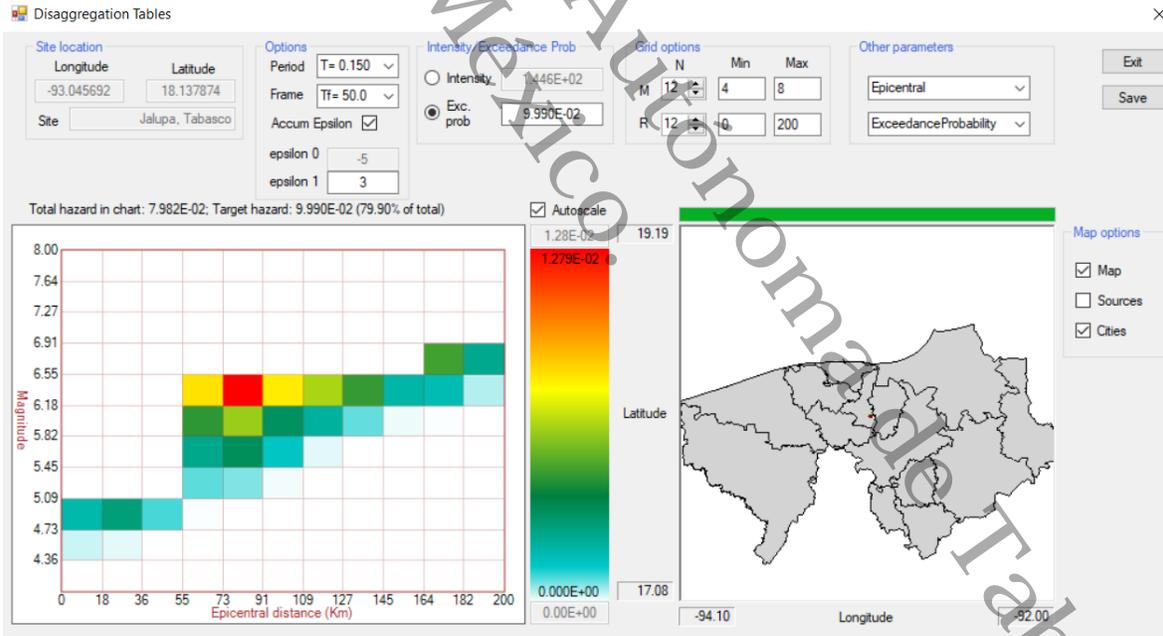


Figura 17 Ventana del software R-CRISIS para realizar la desagregación del peligro sísmico.

El parámetro *epsilon* tiene relación con la distribución de las aceleraciones que producen los distintos escenarios sísmicos, este parámetro determina la separación de las aceleraciones

respecto al valor medio, entre mayor sea el ϵ , mayor será la separación y se incluirán más escenarios sísmicos. El programa fija el valor por defecto en 5, sin embargo, después de analizar con respecto de otros valores de ϵ se decidió dejarlo en 3 por convención. La probabilidad de excedencia se fijó con base al periodo de retorno trabajado y el *grid* fue seleccionado en una malla de 12x12. Por último, se decidió trabajar con la distancia epicentral ya que así se podría apreciar la posible localización de los escenarios respecto al punto de interés. Se obtuvieron 2 *charts* de desagregación por cada periodo de retorno: uno para roca y otro para suelo, dando un resultado de 4 *charts*.

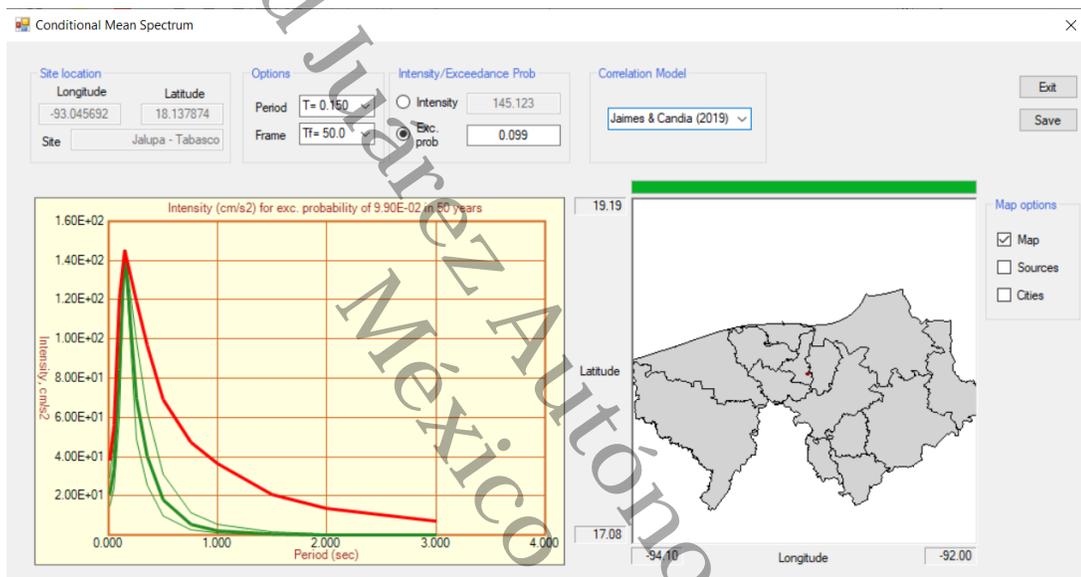


Figura 18 Ventana de R-CRISIS para calcular el CMS. La curva roja representa el UHS a partir del cual se obtiene el CMS; la curva verde gruesa es el CMS para Jalpa de Méndez en el punto de interés mientras que las curvas verde delgadas representan la desviación estándar de los datos.

Finalmente, se utilizó el módulo de espectro medio condicional en R-CRISIS para obtener el CMS en roca y considerando efectos de sitio. En este apartado se seleccionó el periodo condicionante como 0.15 s por ser el periodo donde el UHS alcanza su máximo, la probabilidad de excedencia se seleccionó con base a los periodos de retorno de 475 años y 2475, es decir, 0.099 y 0.02 respectivamente. Finalmente, el programa da dos opciones para utilizar factores de correlación para el cálculo del CMS en periodos distintos al periodo condicionante, se seleccionaron los factores de Jaimes y Candia (2019) dado que fue un trabajo realizado a partir de datos de sismos en México.

Capítulo IV: Resultados

Como producto del trabajo realizado se presentan mapas de aceleraciones por periodo estructural, espectros probabilísticos (*UHS* y *CMS*) y *charts* de desagregación. Los medios de propagación considerado fueron roca y suelo, siendo este último el medio donde se consideraron los efectos de sitio. Asimismo, también se consideraron dos periodos de retorno (PR): 475 y 2475 años.

4.1 Periodo de retorno de 475 años

En esta sección se presentan los resultados de UHS y mapa de periodo estructural de 0.15 s tanto para roca como para suelo tomando en cuenta un PR de 475 años para ambos casos.

4.1.1 Resultados en roca

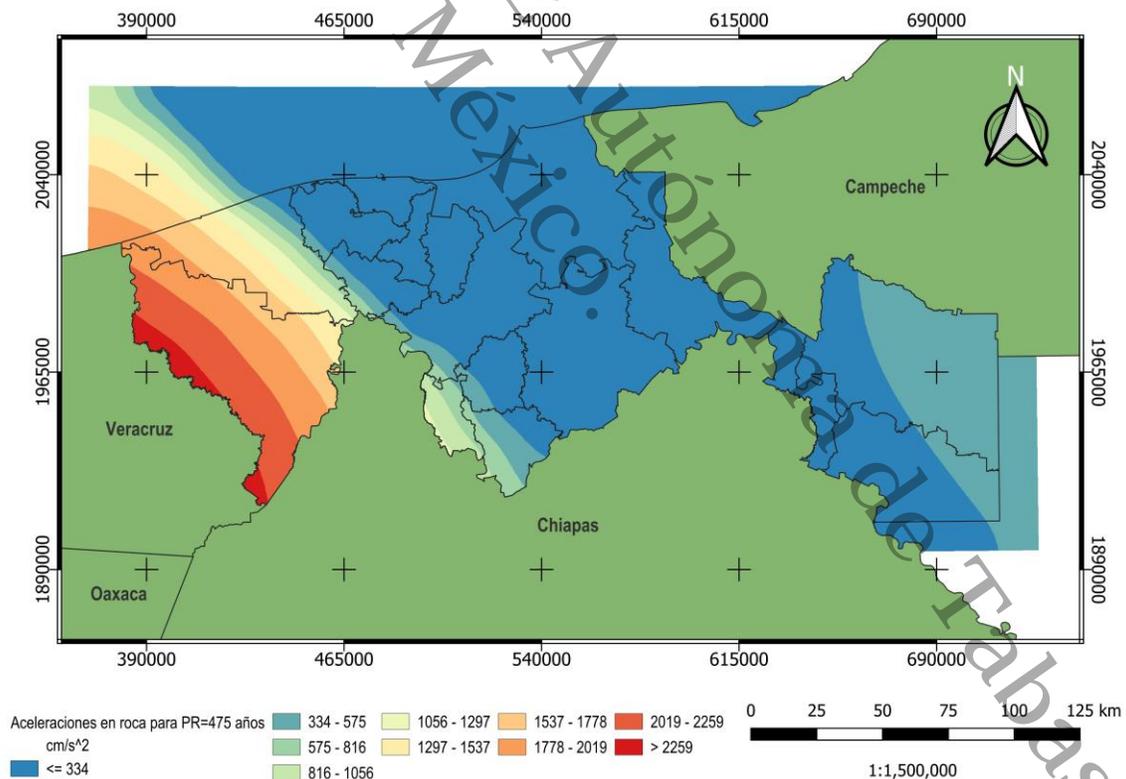


Figura 19 Mapa de aceleraciones del suelo en Tabasco para un periodo estructural de 0.15 s considerando el medio de propagación como roca.

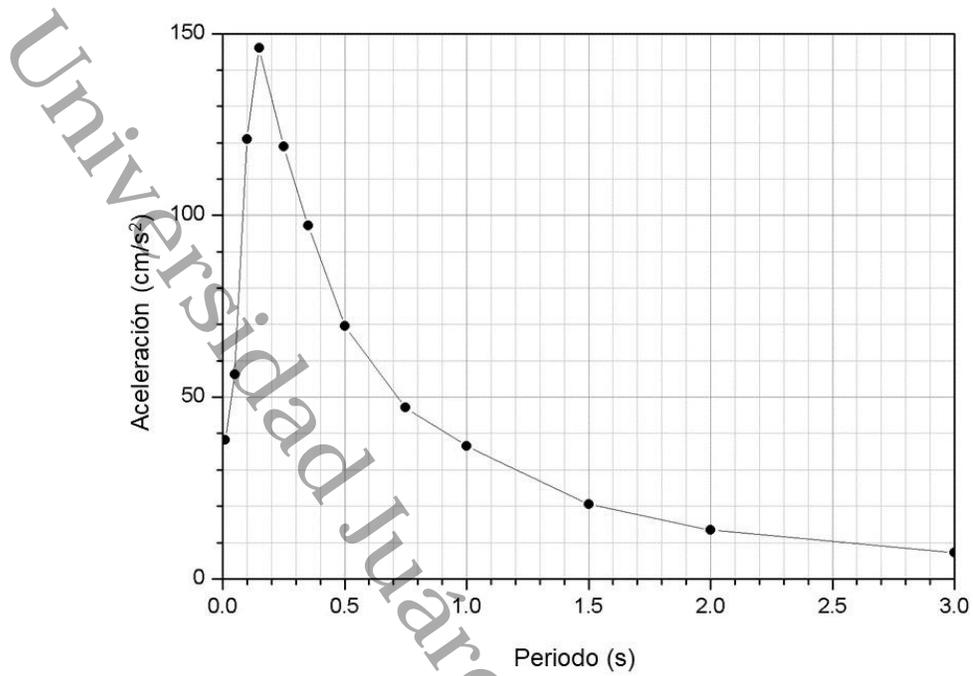


Figura 20 UHS correspondiente a Villa Jalupa, Jalpa de Méndez considerando el medio de propagación como roca.

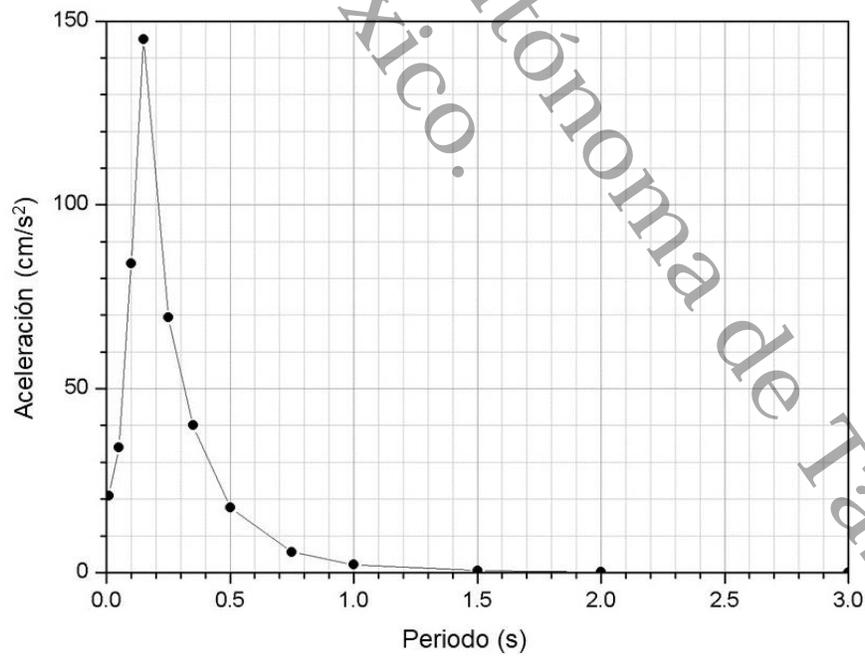


Figura 21 CMS correspondiente a Villa Jalupa, Jalpa de Méndez considerando el medio de propagación como roca para un periodo condicionante de 0.15 s.

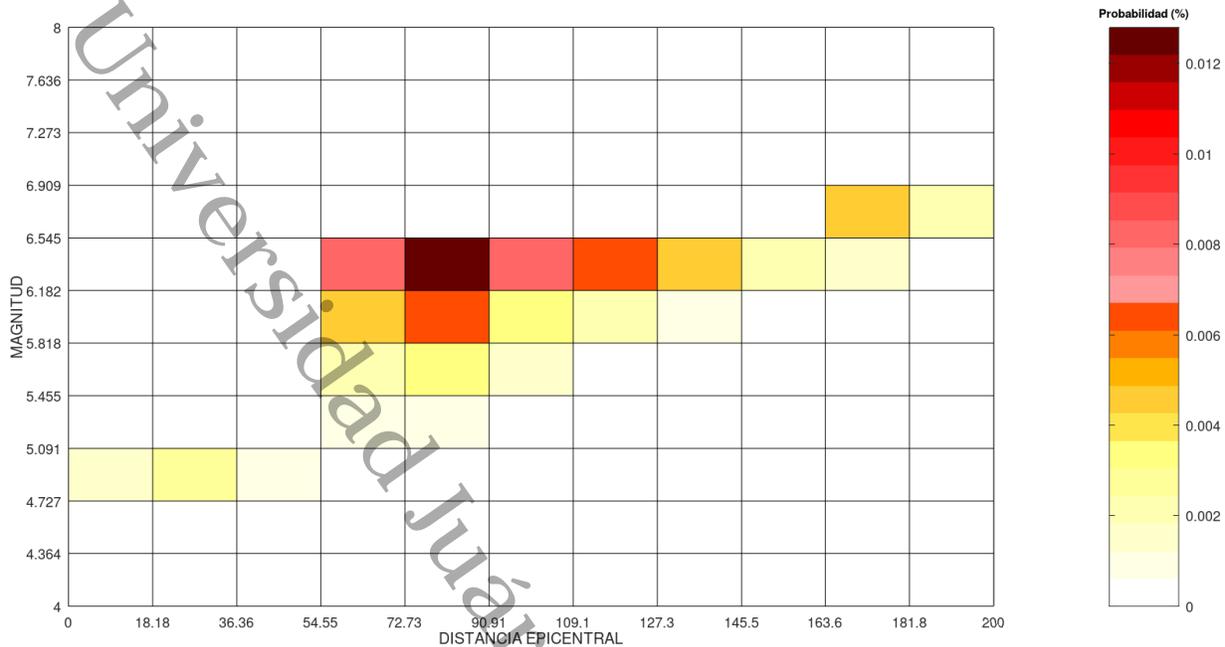


Figura 22 Desagregación del peligro sísmico para Villa Jalapa, Jalpa de Méndez para un periodo estructural de 0.15 s y un periodo de retorno de 475 años considerando el medio de propagación como roca.

4.1.2 Resultados en suelo

El hecho de considerar el medio de propagación como suelo se realizó para integrar los efectos de sitio al PSHA. Como resultado se obtienen 2 UHS: uno seleccionando un tipo de suelo NEHRP en la GMPE de Zhao *et. al.* (2006), y el otro contemplando efectos de sitio utilizando la malla de V_{s30} obtenida del USGS.

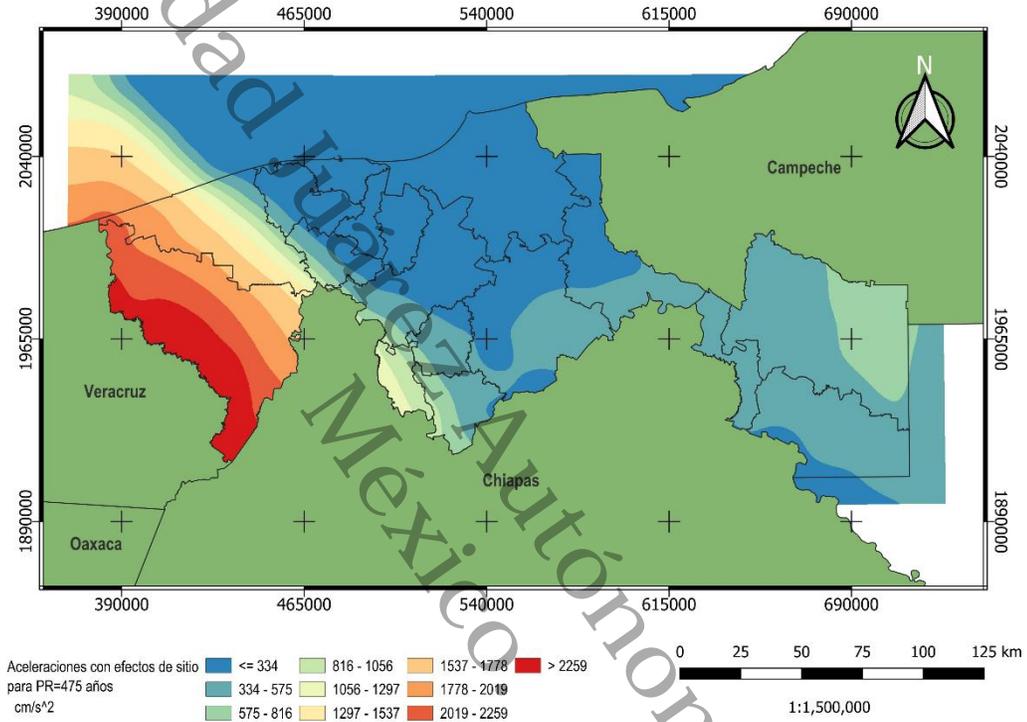


Figura 23 Mapa de aceleraciones del suelo en Tabasco para un periodo estructural de 0.15 s considerando el medio de propagación como suelo.

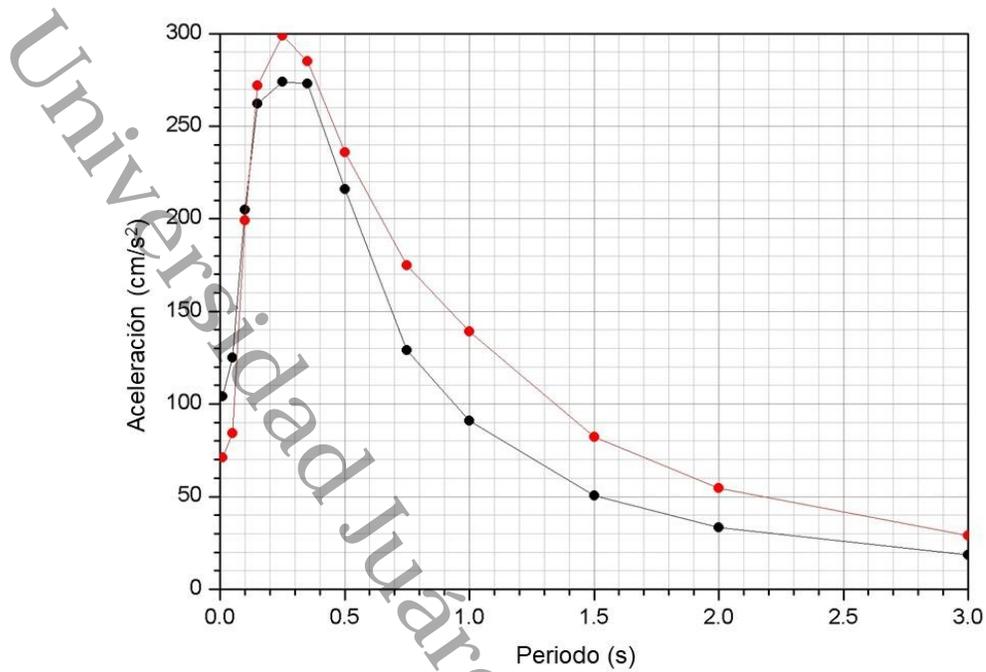


Figura 24 UHS considerando efectos de sitio para Villa Jalupa, Jalpa de Méndez. La curva roja es el UHS utilizando la malla de V_{s30} y la curva negra es el UHS seleccionando un tipo de suelo en la GMPE de Zhao et al. (2006).

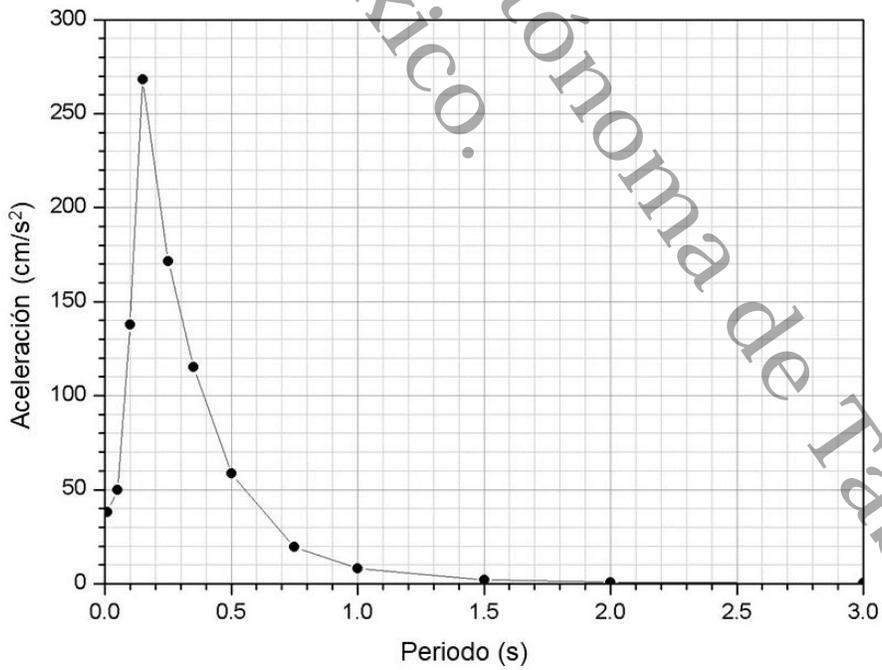


Figura 25 CMS considerando efectos de sitio para Villa Jalupa, Jalpa de Méndez para un periodo condicionante de 0.15 s.

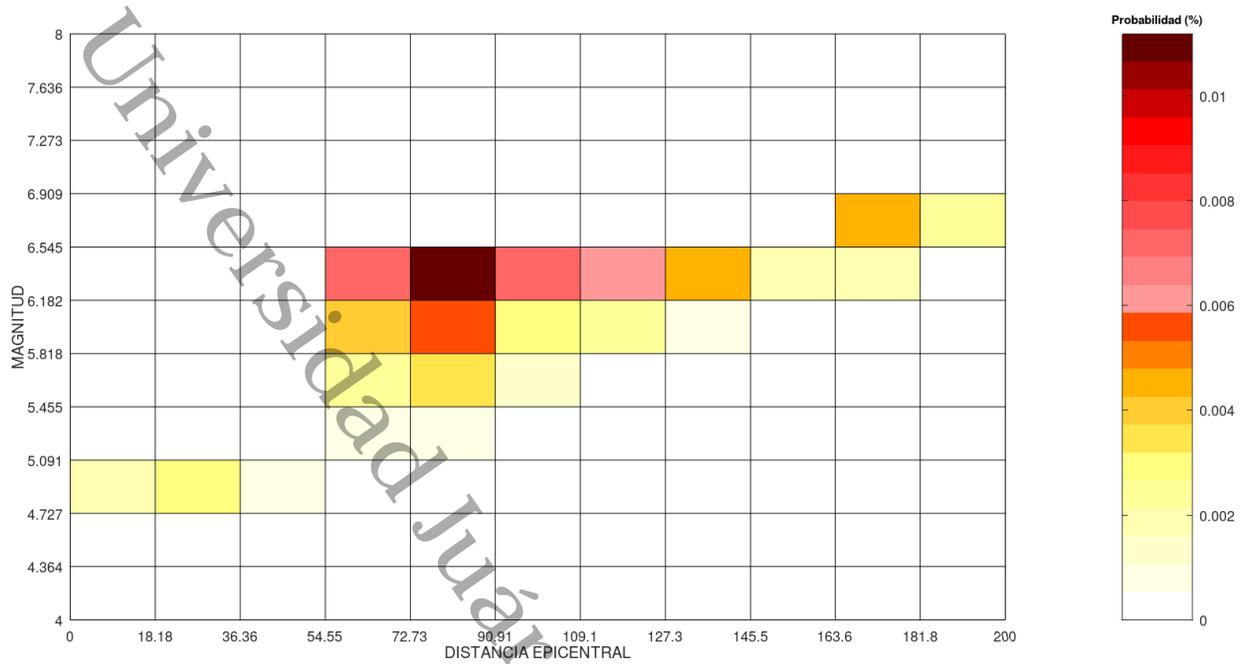


Figura 26 Desagregación del peligro sísmico para Villa Jalupa, Jalpa de Méndez para un periodo estructural de 0.15 s y un periodo de retorno de 475 años considerando el medio de propagación como suelo.

4.2 Periodo de retorno de 2475 años

4.2.1 Resultados en roca

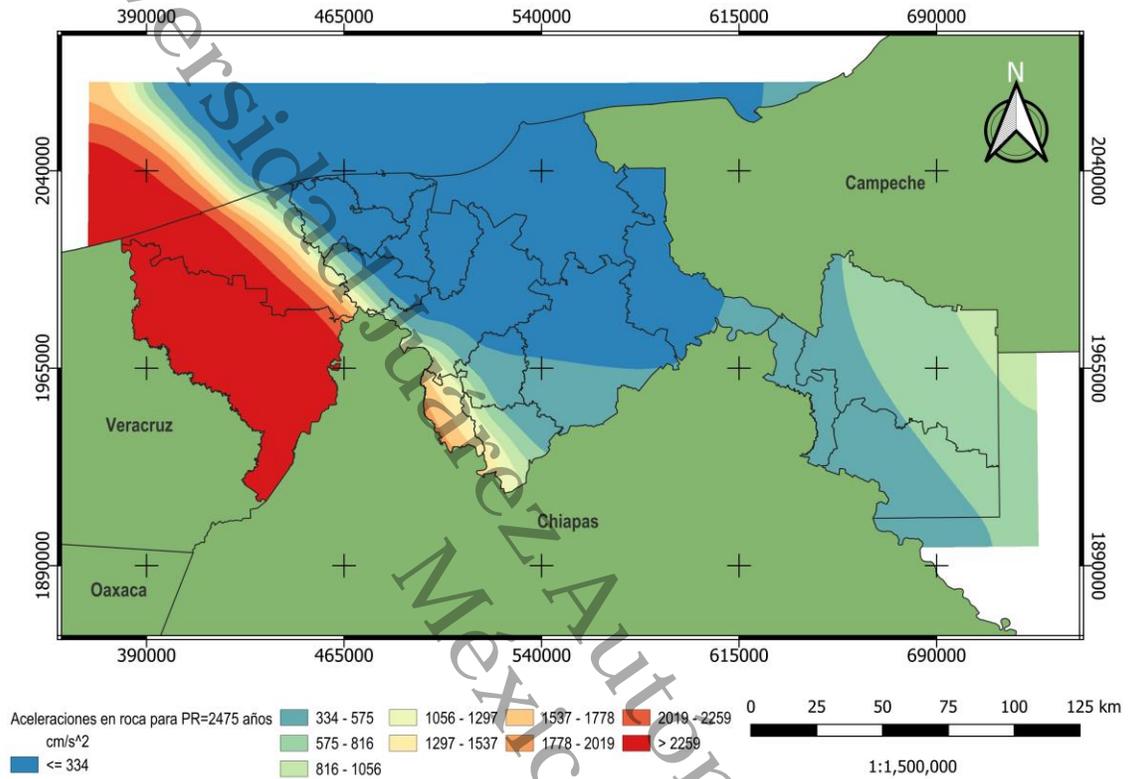


Figura 27 Mapa de aceleraciones del suelo en Tabasco para un periodo estructural de 0.15 s considerando el medio de propagación como roca.

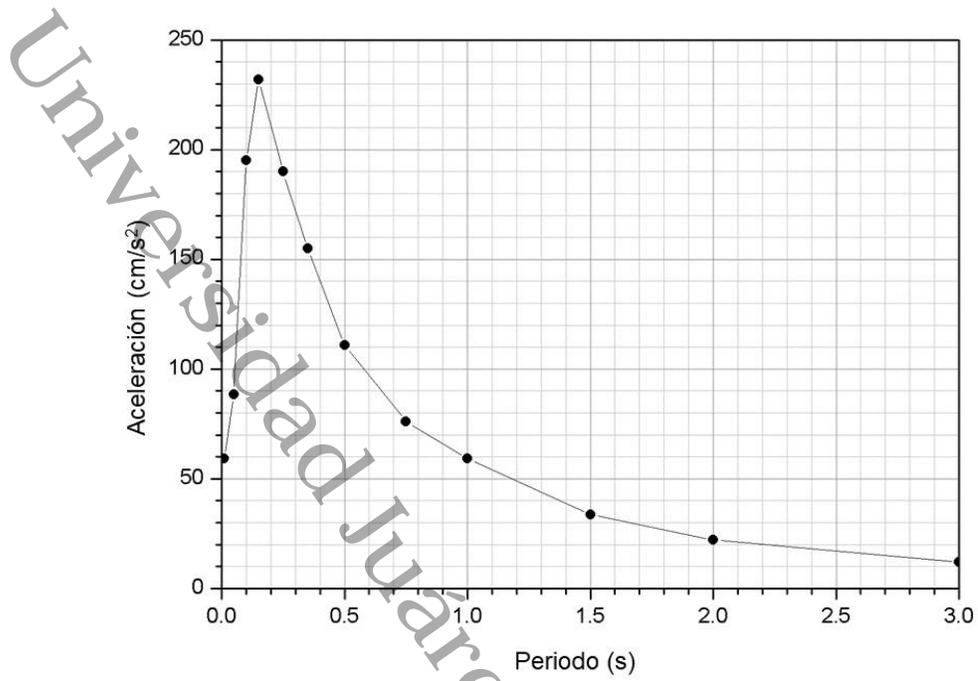


Figura 28 UHS para Villa Jalupa, Jalpa de Méndez considerando el medio de propagación como roca.

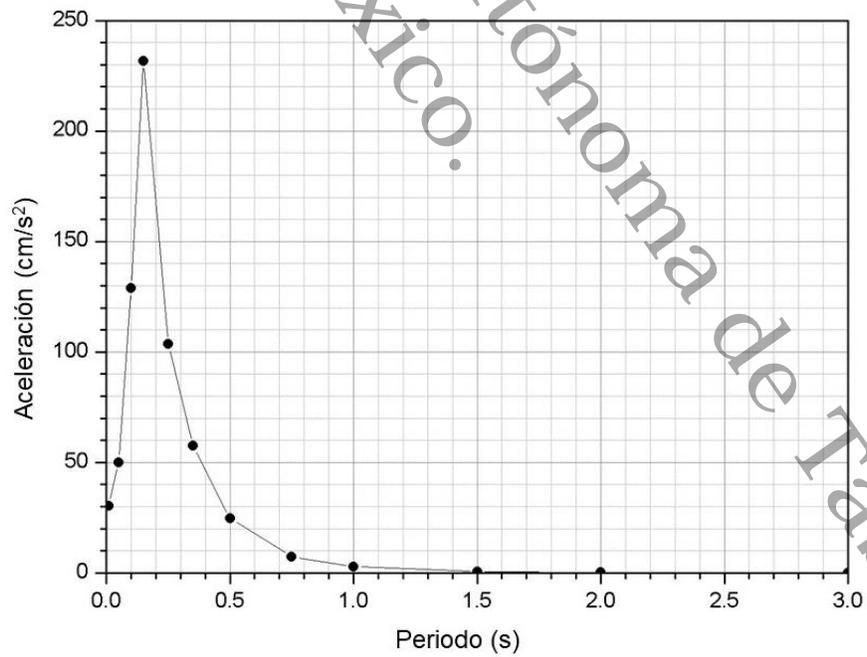


Figura 29 CMS para Villa Jalupa, Jalpa de Méndez considerando el medio de propagación como roca para un periodo condicionante de 0.15 s.

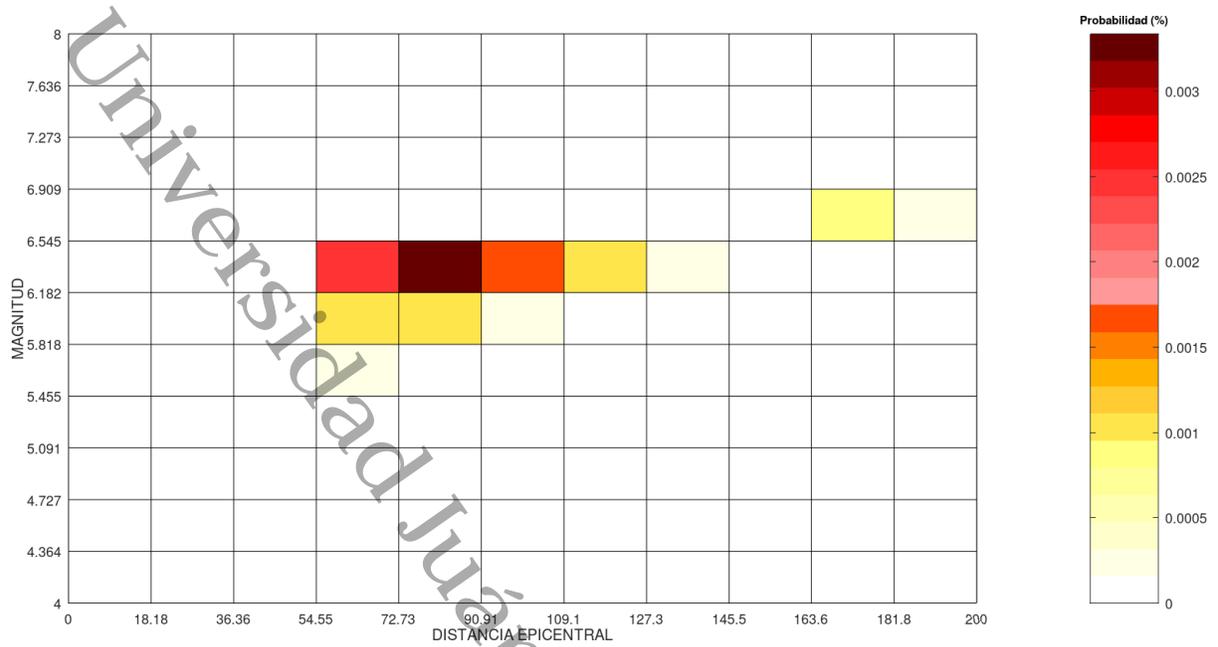


Figura 30 Desagregación del peligro sísmico para Villa Jalupa, Jalpa de Méndez para un periodo estructural de 0.15 s y un periodo de retorno de 2475 años considerando el medio de propagación como roca.

4.2.2 Resultados en suelo

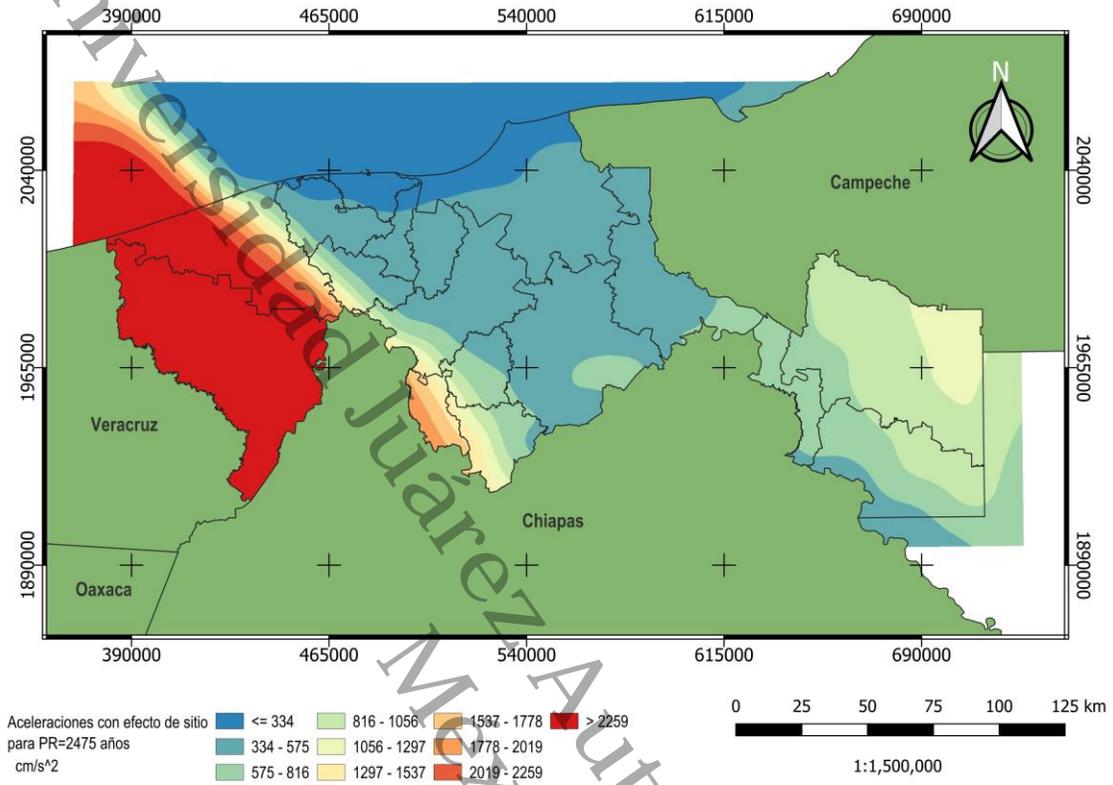


Figura 31 Mapa de aceleraciones del suelo en Tabasco para un periodo estructural de 0.15 s considerando el medio de propagación como suelo.

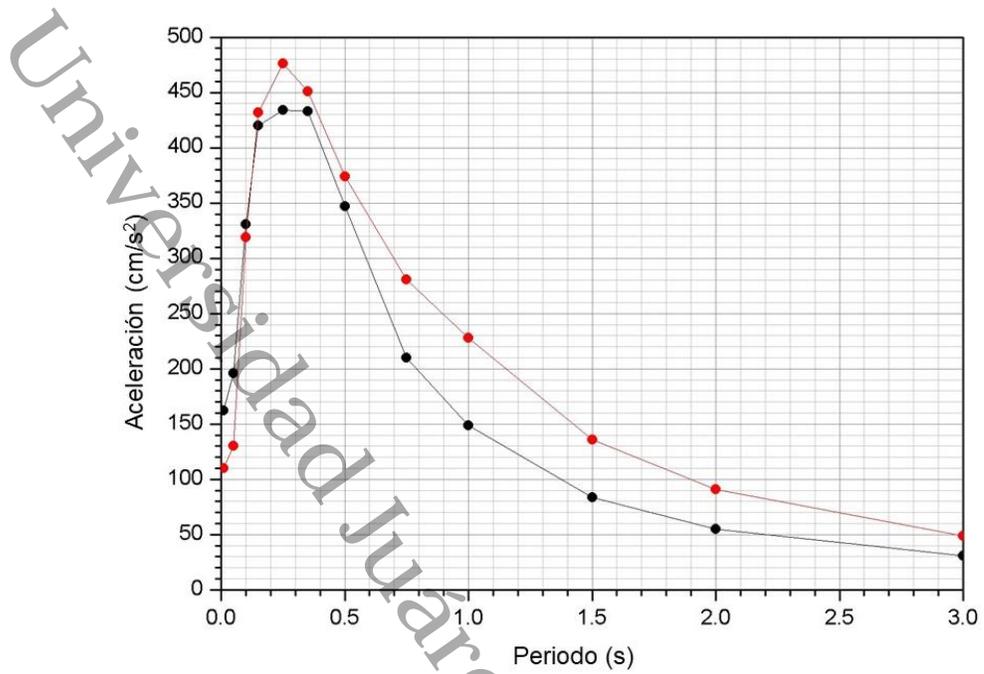


Figura 32 UHS considerando efectos de sitio para Villa Jalupa, Jalpa de Méndez. La curva roja es el UHS utilizando la malla de V_{s30} y la curva negra es el UHS seleccionando un tipo de suelo en la GMPE de Zhao et al. (2006).

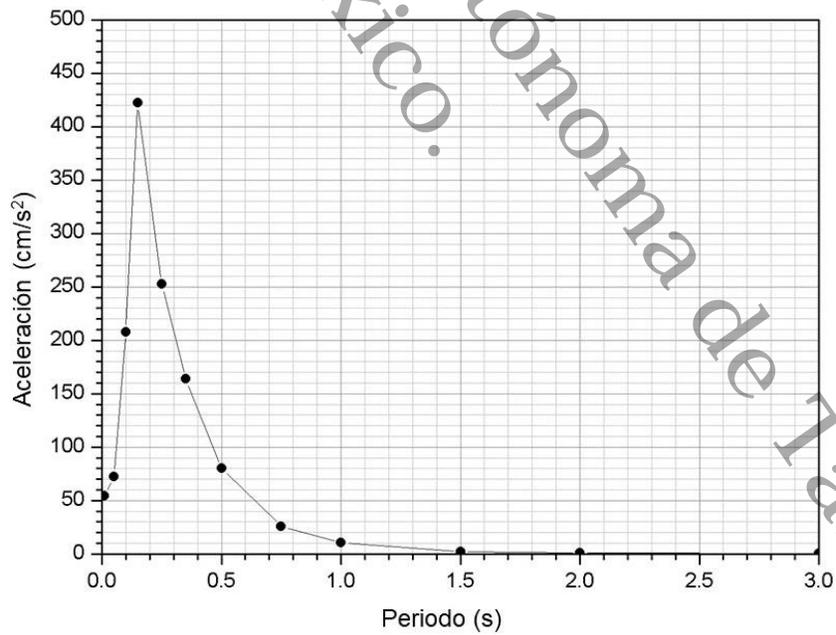


Figura 33 CMS considerando efectos de sitio para Villa Jalupa, Jalpa de Méndez con un periodo condicionante de 0.15 s.

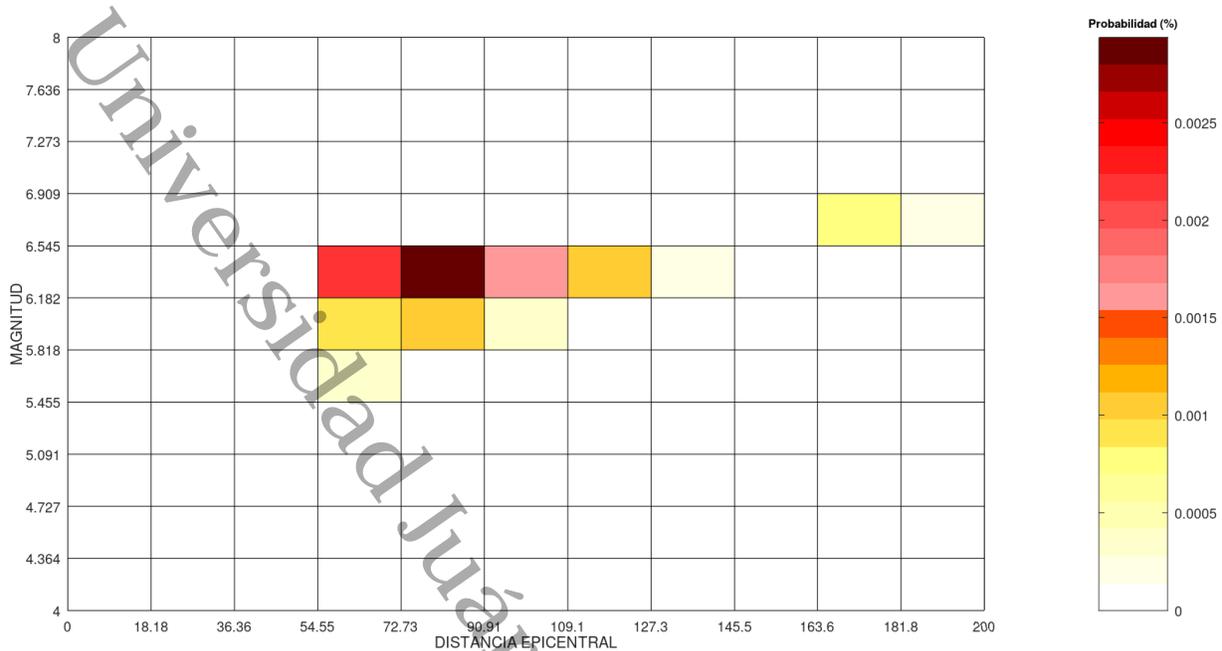


Figura 34 Desagregación del peligro sísmico para Villa Jalapa, Jalpa de Méndez para un periodo estructural de 0.15 s y un periodo de retorno de 2475 años considerando el medio de propagación como suelo.

Capítulo V: Discusiones y conclusiones

Los mapas de aceleraciones según el periodo estructural muestran que la parte central del estado experimenta las aceleraciones más bajas para un periodo de 0.15 s, además, las tendencias en la distribución de las aceleraciones a través del estado tienden a ser similares para un mismo periodo de retorno. Considerar el medio de propagación como suelo hace que las isólinas de aceleraciones en los mapas cambien ligeramente pero aun así conservan cierta similitud con las isólinas en roca. En el mapa de la Figura 35, se aprecia que las isólinas de mayor aceleración se encuentran hacia los límites con Chiapas y Veracruz, porción del estado cubierta principalmente por suelo Aluvial. Para Jalpa de Méndez también se puede apreciar que casi toda su superficie se encuentra cubierta por suelo Aluvial. Al comparar los mapas para un mismo periodo de retorno, pero con diferente medio de propagación se puede apreciar que las zonas de mayor aceleración aumentan su área al considerar el medio como suelo. Destaca el hecho de que para un periodo de retorno de 2475 años la mayor parte de Jalpa pasa a un rango de 334-575 gal cuando se considera el medio de propagación como suelo, tal como se aprecia en la Figura 31.

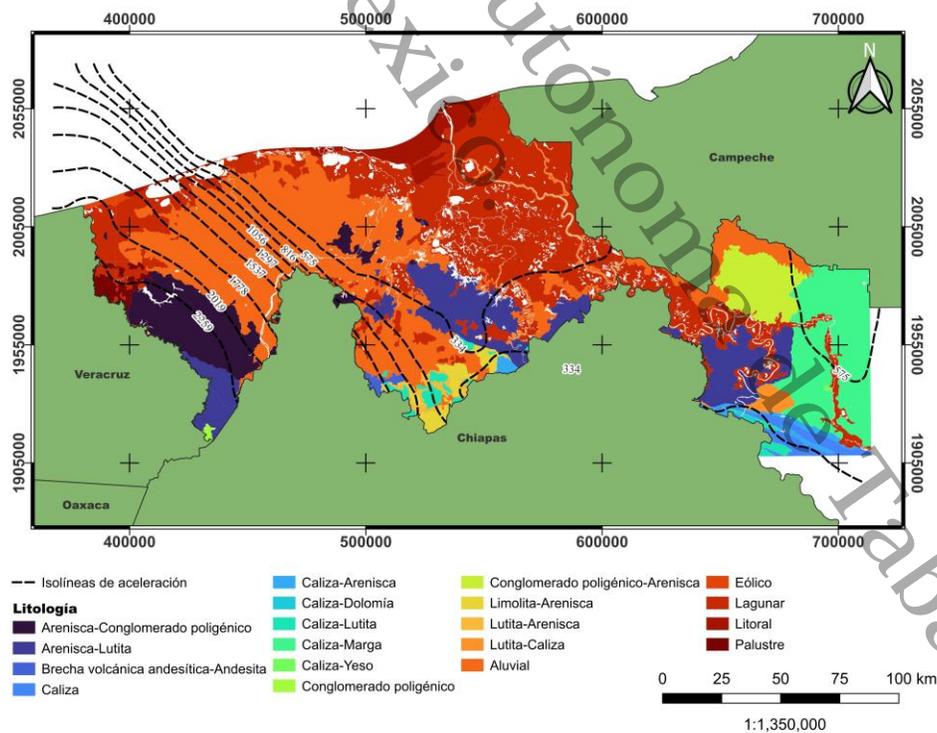


Figura 35 Mapa de las isólinas de aceleración y la geología de Tabasco. Las isólinas corresponden al mapa de aceleración contemplando efectos de sitio para un periodo de 0.15 s y un periodo de retorno de 475 años.

En el mapa de V_{s30} se observa que conforme se acerca a la línea de costa, con la disminución de la altura y el aumento de la presencia de sedimentos, los valores de las velocidades también se van a menor velocidad. Lo anterior se afirma a partir de que los datos utilizados del *USGS* para realizar el mapa fueron inferidos por dicha institución a partir de la topografía de la zona, de allí que los valores aumenten conforme se acercan a Chiapas, ya que allí hay cadenas montañosas. Dentro de Jalpa de Méndez predominan los valores de 200-275 m/s lo cual corresponde a un tipo de suelo D (suelo rígido) según la clasificación de *NEHRP*. Es importante mencionar que se aprecian zonas donde el valor es menor a 200 m/s.

El escenario de mayor contribución al peligro sísmico es en un rango de 72 a 90 km de distancia epicentral a partir de las coordenadas tomadas en Villa Jalupa, Jalpa de Méndez y de magnitud entre 6.1 a 6.5. Dicho escenario se mantiene como el más peligroso para todos los periodos de retorno y medios de propagación considerados. Dada la distancia epicentral, este escenario se considera sismicidad intraplaca, debido a que hay una gran distancia entre el radio de ocurrencia y la zona de subducción de Cocos-Norteamérica. Para el periodo de retorno de 475 años se puede apreciar que hay escenarios que tienen una contribución significativa al peligro sísmico y tienen rangos de magnitud que van de 4.7 a 5.8 y distancias epicentrales menores a 90 km. Por la distancia epicentral se considerarían estos escenarios como sismicidad cortical.

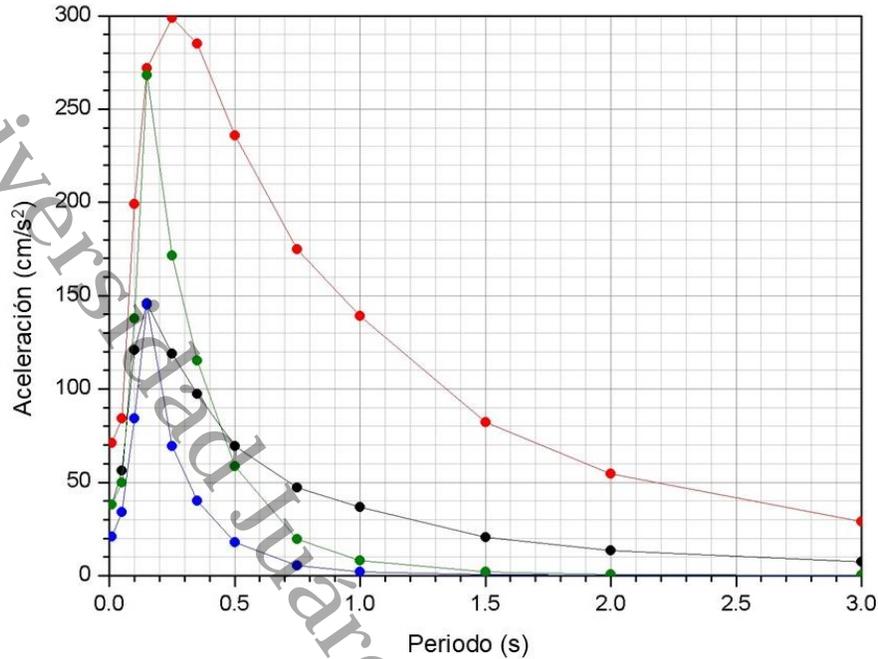


Figura 36 Comparación de los espectros probabilísticos para un periodo de retorno de 475 años. Las curvas negra y roja corresponden al UHS en roca y suelo respectivamente mientras que las curvas azul y verde corresponden al CMS en roca y suelo respectivamente.

Al igual que en el caso de los UHS, se mantiene similitud en la forma de los CMS para ambos periodos de retorno, aunque exista el cambio en el medio de propagación de roca a suelo. Por otro lado, la forma del UHS difiere notablemente de la forma del CMS para cualquiera de los medios de propagación considerados en este trabajo. Para ambos medios de propagación, el CMS alcanza su máximo en el periodo de 0.15 s esto debido a que este fue el periodo condicionante. Hasta dicho periodo las aceleraciones entre el UHS y el CMS mantienen una diferencia notoria pero no grande, pasando los 0.15 s las aceleraciones del CMS decaen de una forma muy pronunciada debido a que la distancia al periodo condicionante aumenta. Estos cambios se pueden apreciar de mejor manera entre el UHS y el CMS para suelo.

Respecto a la integración de los efectos de sitio mediante los valores de V_{s30} , en la Figura 24, se muestra que los dos métodos utilizados (uso de las GMPE para suelo y la malla de V_{s30}) producen espectros con valores muy similares, esto se atribuye a que ambos métodos se basan en el uso de V_{s30} para determinar la aceleración calculada. En la Figura 32, se observa el mismo comportamiento. Para ambos periodos de retorno, el UHS que utiliza la malla de V_{s30} se mantiene

por debajo del *UHS* obtenido por las *GMPE* para suelo hasta el periodo de 0.15 s, a partir de ese periodo dicha situación se invierte.

La diferencia entre ambos *UHS* con efectos de sitio se atribuye a que uno utiliza una malla de V_{s30} mientras que el otro trabaja con un valor promedio, por lo cual el primero produciría una respuesta más cercana a la realidad debido a que es más detallado con los valores de V_{s30} a utilizar. Es importante mencionar también que cuando se hace la integración de los efectos de sitio a los *UHS* el periodo donde se alcanza la máxima aceleración es de 0.25 s, contrario al *UHS* en roca donde dicho periodo es 0.15 s.

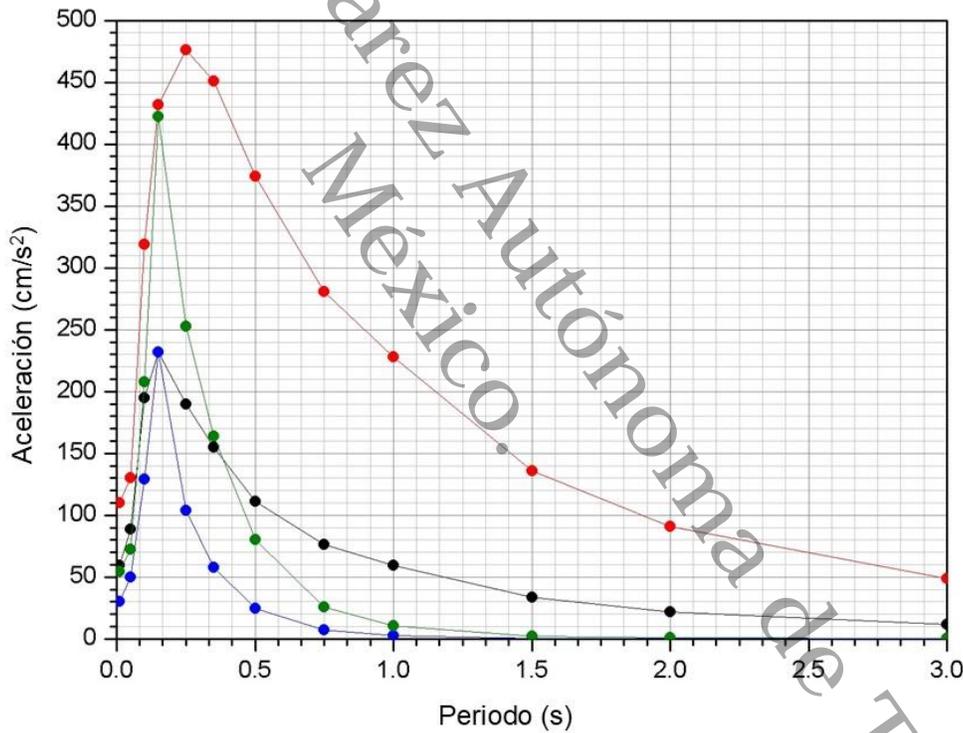


Figura 37 Comparación de los espectros probabilísticos para un periodo de retorno de 2475 años. Las curvas negra y roja corresponden al *UHS* en roca y suelo respectivamente mientras que las curvas azul y verde corresponden al *CMS* en roca y suelo respectivamente.

Para un periodo de retorno de 475 años, el *CMS* considerando efectos de sitio tiene un máximo de aceleración de 268 cm/s² en el periodo condicionante de 0.15 s, a partir de un periodo

de 1.5 s las aceleraciones tienden a 0, mientras que en el caso de un periodo de retorno de 2475 años el *CMS* considerando efectos de sitio tiene un máximo de aceleración en 422 cm/s^2 para el periodo condicionante de 0.15 s al igual que con el *CMS* anterior, a partir de 1.5 s las aceleraciones tienden a 0. El aumento en la aceleración máxima con el cambio en el periodo de retorno se atribuye a que al incrementarlo se consideran escenarios sísmicos más severos en el *PSHA*, pero menos frecuentes. Para poder cubrir todo el rango de periodos que abarca el *UHS* es necesario realizar más de un *CMS*, es decir, se necesita seleccionar más de un periodo condicionante.

A partir de los mapas de aceleración en función al periodo estructural se puede apreciar que el peligro sísmico varía dentro de la entidad, se nota que las zonas de mayor aceleración se encuentran en los límites con Veracruz y Chiapas mientras que en la porción central del estado, donde se ubica Jalpa de Méndez, y los límites con Campeche, se hallan las zonas de menor aceleración. Este último hecho se atribuye a que la zona de Jalpa de Méndez se encuentra predominada por suelo Aluvial, seguido de partes de suelo Lagunar, tal como se puede observar en la Figura 5. Comparando esto con el mapa de peligro sísmico elaborado por la CFE, se retoma el punto de que se puede tener una mejor noción de la demanda sísmica con estudios enfocados a la entidad específica, pudiéndose identificar cambios en aceleraciones dentro de algunos municipios. Por lo anterior es que se puede afirmar que, a pesar de no ser reconocido por actividad sísmica notable, los *PSHA* son útiles para Tabasco.

Bibliografía

Abrahamson, N. A., Silva, W. J. (1997). Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1), 94–127. <https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.94>

Alamilla, J. L., Vai, R., & Esteva, L. (2021). Probabilistic seismic hazard analysis under incomplete data and imperfect source characterization: the Gulf of Mexico case study. *Journal of Seismology*, 25, 487–498. <https://doi.org/10.1007/s10950-021-09992-1>

Álvarez, E. R. (2021). *Análisis de peligro sísmico para el centro de México y estimación del riesgo asociado a un modelo base en el Valle de Acambay, Estado de México*.

Arroyo, D., García, D., Ordaz, M., Mora, M. A., & Singh, S. K. (2010). Strong ground-motion relations for Mexican interplate earthquakes. *Journal of Seismology*, 14, 769–785. <https://doi.org/10.1007/s10950-010-9200-0>

Baker, J. W. (2011). Conditional Mean Spectrum: Tool for Ground-Motion Selection. *Journal of Structural Engineering*, 137(3), 322–331. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000215](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000215)

Baker, J. W. (2013). *An introduction to probabilistic seismic hazard analysis*. White paper version, 79.

Bonett-Díaz, R. L. (2003). *Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada* [tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña]. Universidad Politécnica de Cataluña. <http://dx.doi.org/10.5821/dissertation-2117-93542>

Buenrostro, A. M., Gómez-Bernal, A., & Juárez-García, H. (2021). Análisis de peligro sísmico y efectos de sitio para la zona metropolitana de Guadalajara. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 26(1), 89–123. <https://doi.org/10.24133/riie.v26i1.1960>

Carlton, B., & Abrahamson, N. (2014). *Issues and Approaches for Implementing Conditional Mean Spectra in Practice*. Bulletin of the Seismological Society of America, 104(1), 503–512. <https://doi.org/10.1785/0120130129>

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2023). *Información básica de peligros naturales a nivel municipal*.

Chávez-García, F. J., Montalva, G. A. (2014). *Efectos de sitio para ingenieros geotécnicos, estudio del valle Parkway*. Obras y Proyectos 16, 6-30.

Chávez-López, R., & Bojórquez-Mora, E. (2016). Análisis de peligro sísmico probabilístico usando una nueva medida de intensidad sísmica. Dyna, 83(195), 206–215. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n195.50231>

Chiou, B. S. J., & Youngs, R. R. (2014). Update of the Chiou and Youngs NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. Earthquake Spectra, 30(3), 1117–1153. <https://doi.org/10.1193/072813EQS219M>

Comisión Federal de Electricidad (CFE) (2015). *Manual de diseño de obras civiles, capítulo C 1.3 Diseño por sismo*. 24-25

Domínguez Caicedo, M., (2014). *Períodos de vibración de las edificaciones*. Revista de Arquitectura e Ingeniería, 8(2), 1-13. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193932724001>

Eraso, J., & Servicio Geológico Colombiano. (2015). *Cálculo del promedio de velocidad de onda de corte a 30 metros de profundidad (V_{s30}) en Colombia como una aproximación a la estimación de los efectos sísmicos de sitio a escala nacional*.

Esteva-Maraboto, L. (2018). *Peligro, vulnerabilidad y riesgo sísmico*. Ciencia, 69(3), 30-35.

Fowler, C. M. R. (2005). *The Solid Earth An Introduction to Global Geophysics*. Cambridge University Press.

Gálvez-Díaz, C. D. (2023). *Nivel de desempeño sísmico utilizando espectro probabilístico*. Universidad Nacional de Cajamarca.

García, D., Singh, S. K., Herráiz, M., Ordaz, M., & Pacheco, J. F. (2005). Inslab Earthquakes of Central Mexico: Peak Ground-Motion Parameters and Response Spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(6), 2272–2282. <https://doi.org/10.1785/0120050072>

García, D., Singh, S. K., Herráiz, M., Ordaz, M., & Pacheco, J. F. (2005). Inslab Earthquakes of Central Mexico: Peak Ground-Motion Parameters and Response Spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(6), 2272–2282. <https://doi.org/10.1785/0120050072>

García-de la Huerta, F. J. L. (2023). *Estudio de la envolvente en el tiempo considerando la sismicidad de tipo subductiva en Chile para la generación de curvas de atenuación* [Memoria de licenciatura, Universidad de Chile facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Civil]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/195372>.

Goel, R. K., & Chopra, A. K. (1997). Period Formulas for Moment-Resisting Frame Buildings. *Journal of Structural Engineering*, 123(11), 1454–1461. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:11\(1454\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:11(1454))

González-Partida, E., Camprubí, A., Canet, C., & González-Sánchez, F. (2008). Fisicoquímica de salmueras e hidrocarburos en cuencas petroleras y en depósitos minerales tipo Mississippi Valley y asociados. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 60(1), 23–42.

Heath, D. C., Wald, D. J., Worden, C. B., Thompson, E. M., & Smoczyk, G. M. (2020). A global hybrid VS30 map with a topographic slope-based default and regional map insets. *Earthquake Spectra*, 36(3), 1–15. <https://doi.org/10.1177/8755293020911137>

INEGI. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*.

Jaimés, M. A., & Candia, G. (2019). Interperiod Correlation Model for Mexican Interface Earthquakes, 2019. *Earthquake Spectra*, 35(3), 1351–1365. <https://doi.org/10.1193/080918EQS200M>

K. Johnson, M. Villani, K. Bayliss, C. Brooks, S. Chandrasekhar, T. Chartier, Y. Chen, J. Garcia-Pelaez, R. Gee, R. Styron, A. Rood, M. Simionato, M. Paganì (2023). Global Earthquake Model (GEM) Seismic Hazard Map (version 2023.1 - June 2023), DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8409647>

Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Science.

Kijko, A. (2020). Seismic Hazard. In: Gupta, H. (eds) *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10475-7_10-1

López-Jara, I. A. (2016). *Estudio de la generación de espectros medios condicionales utilizando la base de datos de sismos con magnitud de momento igual o superior a 6.5 en Chile* [tesis de licenciatura, Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Civil]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/142077>

McGuire, R. K. (2007). *Probabilistic seismic hazard analysis: Early history*. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 329–338. <https://doi.org/10.1002/eqe.765>

Ocola, L. (2019). *Peligro, vulnerabilidad, riesgo y la posibilidad de desastres sísmicos en el Perú*. *Revista Geofísica*, (61), 81-125.

Ordaz M. and Salgado-Gálvez M.A. (2020). *R-CRISIS v20 Validation and Verification*. Document. ERN Technical Report. Mexico City, Mexico.

Ordaz, M., & Giraldo Sebastián, S.-G. M. (2021). *R-CRISIS: 35 years of continuous developments and improvements for probabilistic seismic hazard analysis*. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19, 2797–2816. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01098-w>

Padilla-Sánchez, R. J. (2007). Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59(1), 19–42. <https://doi.org/10.18268/bsgm2007v59n1a3>

Palma-López, D. J., Jiménez-Ramírez, R., Zavala-Cruz, J., Bautista-Zúñiga, F., Gavi-Reyes, F., Palma-Cancino, D. Y. (2017). Actualización de la clasificación de suelos de Tabasco, México. *Agroproductividad*, 10(12), 29–35.

Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., & Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW) active and passive methods. *The Leading Edge*, 26(1), 60–64. <https://doi.org/10.1190/1.2431832>

Ramos-Sánchez, J. A., Díaz, S. A., Mora-Ortiz, R. S., & Polanco-Sotomayor, G. (2024). Optimization of Structural Design in Steel Buildings Based on the Site-Specific Design Spectra of the Mexico Seismic Regulations. *Geosciences*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/geosciences14020032>

Reyes, C., Miranda, E., Ordaz, M., & Meli, R. (2002). Estimación de espectros de aceleraciones correspondientes a diferentes periodos de retorno para las distintas zonas sísmicas de la ciudad de México. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 66, 95–121.

Rodríguez-Lomelí, A. G., & García-Mayordomo, J. (2019). Seismic hazard at a triple plate junction: the state of Chiapas (México). *Natural Hazards*, 97, 1297–1325. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03710-4>

Ruiz-Sibaja, J. A., Godínez-Domínguez, E. A., Díaz-Alvarado, S. A., Pereyra-Roblero, O. E. (2023). *Assessment of the seismic vulnerability of housing in Siltepec, Chiapas (Mexico)*. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras* 28(2), 140-160. <https://doi.org/10.24133/88b9s715>

Schmidt-Díaz, V. (2011). Ecuaciones predictivas del movimiento del suelo para América Central, con datos de 1972 a 2010. *Revista Geológica de América Central*. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0256-70242014000100001#1

Senior Seismic Hazard Analysis Committee. (1997). *Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts*.

Servicio Geológico Mexicano (SGM), & Secretaría de Comunicaciones, Asentamientos y Obras Públicas (SCAOP). (2013). *Atlas de peligro por fenómenos naturales del estado de Tabasco*.

Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2004). Carta Geológico-Minera Frontera E15-5 [Mapa]. https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/105_E15-5_GM.pdf

Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2005). Carta Geológico-Minera Villahermosa E15-8 [Mapa]. https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/106_E15-8_GM.pdf

Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2006). Carta Geológico-Minera Tenosique E15-9 [Mapa]. https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/113_E15-9_GM.pdf

Tapia-Hernández, E., Reddy, E. A., Oros-Avilés, L. J. (2017). *Retos e incertidumbres en la predicción y prevención del riesgo sísmico*. Revista de Ingeniería Sísmica 96, 66-87.

Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra una introducción a la geología física*. Pearson Educación.

Torres-Álvarez, C. R. (2015). Determinación de espectros de diseño sísmico mediante análisis de peligro sísmico. Geotecnia, 237, 20–25.

Urquizo-Quiroz, C. O. (2020). Estudio geofísico por el método de refracción sísmica, MASW 1D, MASW 2D y MAM para el diseño estructural del puente Cantuta-región de Junín [Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/11100>

Zamudio-Zavala, P. E., Gómez-Mora, I., & Mayoral-Ruiz, P. A. (2021). Zonificación sísmica del municipio de Puerto Vallarta, Jalisco. XXX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica, 121–128.

Zavala-Cruz, J., Jiménez Ramírez, R., Palma-López, D. J., Bautista Zúñiga, F., & Gavi Reyes, F. (2016). Paisajes geomorfológicos: base para el levantamiento de suelos en Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 161–171.

Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H. K., Somerville, P. G., Fukushima, Y., & Fukushima, Y. (2006). Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 898–913. <https://doi.org/10.1785/0120050122>

Zúñiga, F. R., Suárez, G., Figueroa-Soto, Á., & Mendoza, A. (2017). A first-order seismotectonic regionalization of Mexico for seismic hazard and risk estimation. *Journal of Seismology*, 21, 1295–1322. <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9666-0>

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Anexos

Sismos registrados en Tabasco con magnitud mayor igual a 4, desde Enero 1990 hasta Agosto 2024, extraído de la base de datos del SSN.

Fecha	Magnitud	Latitud	Longitud	Profundidad (km)
22/02/1991	4.6	17.1	-91.28	75
14/08/1991	4.3	17.66	-93.6	59
01/11/1991	4	21.1	-93.86	20
02/11/1991	4	17.42	-93.78	9
15/12/1991	4.5	17.62	-93.7	146
02/06/1992	4.2	17.4	-93.61	92
06/01/1993	4	17.67	-93.64	100
10/02/1993	4.3	17.6	-93.57	24
16/07/1993	4.4	17.58	-93.71	89
17/07/1993	4.4	18.08	-93.48	60
01/10/1995	4.6	17.3	-92.76	32
25/01/1996	4.7	17.52	-92.82	105
06/06/1996	4.1	19.75	-93.32	64
01/07/1996	4.3	17.8	-92.36	127
11/07/1997	4.3	18.97	-92.7	20
22/03/1998	4.4	18.28	-93.4	74
19/01/1999	4.4	17.39	-92.66	96
13/05/1999	4.2	17.37	-91.45	92
27/03/2000	4	16.99	-91.28	100
01/07/2000	4.4	17.4	-92.94	5
01/07/2000	4	17.46	-92.92	5
09/07/2000	4	17.42	-92.78	5
14/07/2000	4.1	17.41	-93.74	164
14/12/2001	4.2	17.89	-93	100
23/02/2003	4.3	16.68	-90.97	20
11/03/2003	4.6	17.25	-91.41	5
14/08/2003	4	17.44	-93.72	204
16/08/2003	4.1	19.86	-94.06	34
24/01/2004	4.3	16.7	-91.17	238
01/04/2004	4.1	18.36	-93.47	93
15/08/2004	4.3	18.55	-92.93	22
22/09/2004	4	18.07	-93.13	36
13/05/2005	4.5	16.4	-90.56	60
05/12/2005	4.2	18.49	-92.86	68
22/06/2006	4.2	17.64	-93.57	27

11/02/2007	4.4	18.05	-93.18	107
04/03/2007	4.3	16.52	-90.75	83
29/05/2007	4.4	17.51	-92.68	20
08/06/2007	4.4	18.31	-93.46	14
29/06/2007	4.4	17.46	-93.72	68
30/09/2007	4.5	18.66	-93.79	63
07/03/2008	4	16.53	-90.68	24
25/03/2008	4	17.99	-93.06	101
23/04/2008	4.1	18.04	-92.62	115
25/04/2008	4.3	18.1	-92.53	121
20/05/2008	4.2	16.97	-91.19	16
31/05/2008	4.3	16.72	-90.52	20
01/07/2008	4.6	16.45	-90.66	25
16/07/2008	4.1	16.86	-90.51	9
19/09/2008	4	16.86	-91.07	29
18/10/2008	4.2	17.61	-91.55	13
31/10/2008	4	17.77	-93.44	106
27/01/2009	4.2	18.11	-93.45	79
01/06/2009	4	18.34	-93.03	132
29/09/2009	4.2	17.3	-91.29	24
09/10/2009	4.2	17.02	-90.81	75
30/12/2009	4.3	16.71	-91	105
16/05/2010	4.1	16.63	-91.03	20
25/10/2010	4	17.23	-91.64	10
09/03/2011	4.3	17.29	-91.1	95
03/04/2011	4	17.52	-93.66	20
17/07/2011	4.1	17.76	-93.36	72
28/10/2011	4	16.42	-90.41	20
04/04/2012	4	19.532	-92.942	5
15/04/2012	4.8	17.0997	-91.3243	117.8
24/01/2013	4.1	17.9663	-93.1955	23.7
26/08/2013	4.1	17.273	-91.3143	20
21/10/2013	4	18.3192	-93.3068	6.6
23/12/2013	4.3	17.6288	-91.178	16.7
16/01/2014	4.1	17.506	-92.8542	42.9
17/01/2014	4.3	17.7558	-91.4308	20
25/03/2014	4	17.4615	-90.9443	24.3
02/12/2014	4.5	17.492	-92.5363	8.5
05/12/2014	4.2	17.5967	-92.4965	5
05/12/2014	4.1	17.5347	-92.4678	5
21/01/2015	4	17.502	-92.4783	106.1
15/02/2015	4	16.567	-90.3615	16
26/02/2015	4	17.1635	-91.4173	2.9

22/04/2015	4.1	17.4912	-92.8678	5
17/07/2015	4.2	18.3437	-93.1268	4.4
19/07/2015	4.3	17.1288	-90.5973	20
06/11/2015	4	17.5543	-92.3582	20.5
07/01/2016	4.2	18.283	-92.999	5
10/01/2016	4.1	18.2842	-92.9547	10
01/03/2016	4.1	17.2595	-91.3602	24.5
30/05/2016	4.2	17.6173	-93.3978	7.6
24/07/2016	4	16.6078	-90.9513	65.2
17/08/2016	4	18.4852	-92.9317	2.1
03/10/2016	4.1	16.8472	-90.776	20
05/11/2016	4	16.5698	-90.7043	68.7
27/12/2016	4.3	20.8017	-93.068	15
09/02/2017	4	18.1392	-93.2862	5
31/03/2017	4	18.2757	-92.9098	113.4
10/05/2017	4	17.9678	-92.9733	72.5
17/06/2017	4	17.0063	-91.1793	10
06/07/2017	4	17.3225	-91.4823	10
03/09/2017	4.1	18.32	-93.032	59.6
25/10/2017	4	17.3252	-92.8388	99.5
04/01/2018	4	17.3482	-92.9845	10
05/02/2018	4.3	17.3383	-90.9665	45.1
07/02/2018	4.3	17.745	-92.5018	10
03/03/2018	4.3	19.842	-92.6953	15
06/03/2018	4.3	17.8332	-92.6928	10
29/04/2018	4.1	18.7655	-92.9248	10
14/06/2018	4	17.4823	-91.7068	10
02/07/2018	4.3	19.0375	-92.593	10
23/09/2018	4.1	17.8887	-92.6762	10
26/09/2018	4.2	18.8585	-93.0158	10
02/11/2018	4.1	17.3995	-92.9603	6.7
26/12/2018	4	17.2817	-92.8452	10
30/12/2018	4.1	19.6055	-92.4937	15
15/02/2019	4.5	17.5938	-92.385	23.6
15/02/2019	4.1	17.6677	-92.5353	15
22/03/2019	4.3	19.654	-92.4483	4
07/05/2019	4.1	17.2798	-91.685	22
24/05/2019	4.1	18.0452	-93.1833	5
12/08/2019	4.2	18.4442	-93.1187	6.7
24/08/2019	4.2	16.7702	-91.1268	10
30/08/2019	4.7	18.3083	-92.9468	29.5
21/12/2019	4	18.2523	-93.0403	5
21/12/2019	4.1	17.0937	-91.4058	4

12/01/2020	4.2	19.5112	-92.6228	15
29/01/2020	4.3	17.06	-91.5892	10
10/04/2020	4.4	19.3558	-92.6138	6.2
13/04/2020	4	17.0382	-91.5955	99.1
20/04/2020	4.2	18.2113	-93.3048	11.1
08/07/2020	4.3	19.744	-92.7305	15
07/09/2020	4.5	19.6683	-92.4475	10
12/09/2020	4	18.2938	-93.6488	15
09/11/2020	4.2	17.1937	-91.484	5
15/11/2020	4.1	19.2832	-92.4772	10.7
04/12/2020	4.2	17.4318	-92.5523	10
16/12/2020	4	17.3682	-93.6927	16.7
15/01/2021	4	17.5612	-92.9002	10
22/01/2021	4.2	19.3968	-92.5312	10
03/02/2021	4	19.4127	-92.4997	25
28/03/2021	4	16.7725	-91.1837	4.4
31/03/2021	4.1	18.4438	-92.9255	31.3
04/04/2021	4.2	17.3117	-91.7143	10
17/04/2021	4.2	19.3907	-92.5398	5
29/05/2021	4.3	17.7108	-93.6963	46.9
19/06/2021	4.2	19.5378	-92.6165	10
19/08/2021	4.1	18.5765	-92.7707	32.7
09/10/2021	4.3	19.6315	-92.5062	4.1
01/12/2021	4.4	17.039	-91.1632	10
07/12/2021	4	19.7542	-92.5215	10
02/01/2022	4.2	19.5375	-92.583	10
06/02/2022	4.6	21.5212	-93.4767	10
17/05/2022	4.7	16.8015	-91.1963	10
28/05/2022	4.1	17.9783	-93.1653	69.1
23/07/2022	4	18.5458	-93.0862	5
05/08/2022	4.1	18.0873	-93.0473	10
19/08/2022	4.1	16.6468	-91.0063	10
24/08/2022	4.3	18.2625	-93.1135	5
09/09/2022	4	19.4357	-92.5238	4
20/09/2022	4.3	17.5553	-93.5527	70.7
29/09/2022	4	17.9858	-93.5258	30.1
06/10/2022	4.4	16.7843	-91.2167	24.4
13/10/2022	4.1	19.6567	-92.5013	15.7
04/11/2022	4.2	18.3313	-92.909	10
03/12/2022	4.1	17.3502	-93.8035	2.7
12/01/2023	4.4	19.6737	-92.4938	15
10/05/2023	4	17.5462	-93.768	24.9
15/05/2023	4.2	18.4425	-92.8557	29.2

16/05/2023	4	18.4602	-92.9633	28.9
17/05/2023	4	18.1562	-93.6842	10.2
01/06/2023	4.1	18.0575	-93.6298	45.1
01/06/2023	4	18.1002	-93.669	15.2
02/06/2023	4.1	19.3715	-92.5603	20
30/06/2023	4.1	19.7597	-93.0703	10
01/07/2023	4.1	19.6742	-92.9963	10
02/07/2023	4.2	19.3628	-92.5613	5
08/07/2023	4.3	19.5557	-92.4802	10
14/07/2023	4.1	17.7412	-92.815	10
31/07/2023	4.1	17.4937	-92.829	140.4
05/08/2023	4.1	17.3693	-91.2413	28.6
18/09/2023	4	18.2355	-93.2808	30
28/09/2023	4.2	17.765	-92.7782	5
24/12/2023	4.2	19.562	-92.4715	6.5
13/01/2024	4.3	19.6943	-92.4593	5
26/01/2024	4.2	18.1875	-93.6872	48.6
20/03/2024	4.1	17.67	-93.07	10
04/04/2024	4	18.52	-93.05	10
14/06/2024	4.2	18.06	-93.67	4.1
07/08/2024	4.4	17.39	-91.39	85.2

Parámetros de sismicidad utilizados en las fuentes sísmicas.

NOMBRE DE FUENTE	M0	λ_0	E(β)	CV(β)	E(Mu)
1. Salina del Istmo Basin North	3.300	5.510	1.310	0.100	6.400
2. Tabasco's basins	3.400	6.178	1.490	0.110	5.000
3. Salina del Istmo Basin South	3.400	6.862	1.520	0.030	6.600
4. Chiapas complex	3.400	4.459	1.090	0.070	7.100
5. Strike slip fault province	3.400	3.656	1.010	0.080	6.400
6. Reverse fault province	3.700	4.983	1.140	0.060	5.800
7. Yucatan platform	3.500	3.841	1.100	0.640	7.100
8. Polochic Motagua fault system	3.400	2.704	0.740	0.030	7.600
9. Central American volcanic arc	3.400	2.315	0.660	0.040	8.000
10. Sub 1	3.400	6.337	1.470	0.040	8.600
11. Sub 2	3.400	8.911	1.790	0.020	6.900
12. Sub 3	3.400	6.743	1.320	0.020	7.600
13. Sub 4	3.400	5.150	0.960	0.020	7.400
14. Sub 5	3.400	3.323	0.650	0.020	7.300
15. Deep Inslap I	4.900	7.552	0.700	0.120	7.400
16. Deep Inslap II	4.700	3.346	0.670	0.06	7.200

Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de la Tesis:	Cálculo del espectro medio condicional integrando efectos de sitio para Villa Jalupa, Jalpa de Méndez, Tabasco, México
Autores de la Tesis:	América Monserrat García Hernández David Gustavo Aguilar Arias
ORCID	0009-0003-0224-6119 0009-0003-1470-2847
Resumen de la Tesis:	En el presente trabajo se implementa la metodología del análisis probabilístico de peligro sísmico para obtener espectros que sean de utilidad al momento de estudiar el peligro sísmico de la región en la localidad de Villa Jalupa, Jalpa de Méndez, Tabasco. En primera instancia se realiza un análisis probabilístico de peligro sísmico para el estado de Tabasco, a partir del cual se obtuvo el espectro de peligro uniforme. Posteriormente, con el fin de que el espectro final tomara en cuenta los efectos de sitio, se añadió una malla con valores de V_{s30} obtenidos a partir del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Adicional a esto, en la búsqueda de la identificación de los escenarios de mayor contribución al peligro sísmico, se realizó una desagregación de combinaciones de magnitud y distancia epicentral. Finalmente, a partir del espectro con efectos de sitio se obtuvo el espectro medio condicional, el cual es el que se propone como espectro probabilístico final, ya que no considera una distribución uniforme del peligro sísmico.
Palabras claves de la Tesis:	Espectro de respuesta, Espectro de Peligro Uniforme, Espectro Medio Condicional, análisis probabilístico de peligro sísmico, efectos de sitio, aceleración máxima del suelo, desagregación del peligro sísmico
Referencias citadas:	
<p>Abrahamson, N. A., Silva, W. J. (1997). Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes. <i>Seismological Research Letters</i>, 68(1), 94–127. https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.94</p> <p>Alamilla, J. L., Vai, R., & Esteva, L. (2021). Probabilistic seismic hazard analysis under incomplete data and imperfect source characterization: the Gulf of Mexico case study. <i>Journal of Seismology</i>, 25, 487–498. https://doi.org/10.1007/s10950-021-09992-1</p> <p>Álvarez, E. R. (2021). <i>Análisis de peligro sísmico para el centro de México y estimación del riesgo asociado a un modelo base en el Valle de Acambay, Estado de México.</i></p>	

- Arroyo, D., García, D., Ordaz, M., Mora, M. A., & Singh, S. K. (2010). Strong ground-motion relations for Mexican interplate earthquakes. *Journal of Seismology*, 14, 769–785. <https://doi.org/10.1007/s10950-010-9200-0>
- Baker, J. W. (2011). Conditional Mean Spectrum: Tool for Ground-Motion Selection. *Journal of Structural Engineering*, 137(3), 322–331. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000215](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000215)
- Baker, J. W. (2013). *An introduction to probabilistic seismic hazard analysis*. White paper version, 79.
- Bonett-Díaz, R. L. (2003). *Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada* [tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña]. Universidad Politécnica de Cataluña. <http://dx.doi.org/10.5821/dissertation-2117-93542>
- Buenrostro, A. M., Gómez-Bernal, A., & Juárez-García, H. (2021). Análisis de peligro sísmico y efectos de sitio para la zona metropolitana de Guadalajara. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 26(1), 89–123. <https://doi.org/10.24133/riie.v26i1.1960>
- Carlton, B., & Abrahamson, N. (2014). *Issues and Approaches for Implementing Conditional Mean Spectra in Practice*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(1), 503–512. <https://doi.org/10.1785/0120130129>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2023). *Información básica de peligros naturales a nivel municipal*.
- Chávez-García, F. J., Montalva, G. A. (2014). *Efectos de sitio para ingenieros geotécnicos, estudio del valle Parkway*. *Obras y Proyectos* 16, 6-30.
- Chávez-López, R., & Bojórquez-Mora, E. (2016). Análisis de peligro sísmico probabilístico usando una nueva medida de intensidad sísmica. *Dyna*, 83(195), 206–215. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n195.50231>
- Chiou, B. S. J., & Youngs, R. R. (2014). Update of the Chiou and Youngs NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1117–1153. <https://doi.org/10.1193/072813EQS219M>
- Comisión Federal de Electricidad (CFE) (2015). *Manual de diseño de obras civiles, capítulo C 1.3 Diseño por sismo*. 24-25
- Domínguez Caicedo, M., (2014). *Periodos de vibración de las edificaciones*. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 8(2), 1-13. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193932724001>
- Eraso, J., & Servicio Geológico Colombiano. (2015). *Cálculo del promedio de velocidad de onda de corte a 30 metros de profundidad (Vs30) en Colombia como una aproximación a la estimación de los efectos sísmicos de sitio a escala nacional*.

- Esteva-Maraboto, L. (2018). *Peligro, vulnerabilidad y riesgo sísmico*. Ciencia, 69(3), 30-35.
- Fowler, C. M. R. (2005). *The Solid Earth An Introduction to Global Geophysics*. Cambridge University Press.
- Gálvez-Díaz, C. D. (2023). *Nivel de desempeño sísmico utilizando espectro probabilístico*. Universidad Nacional de Cajamarca.
- García, D., Singh, S. K., Herráiz, M., Ordaz, M., & Pacheco, J. F. (2005). Inslab Earthquakes of Central Mexico: Peak Ground-Motion Parameters and Response Spectra. Bulletin of the Seismological Society of America, 95(6), 2272–2282. <https://doi.org/10.1785/0120050072>
- García, D., Singh, S. K., Herráiz, M., Ordaz, M., & Pacheco, J. F. (2005). Inslab Earthquakes of Central Mexico: Peak Ground-Motion Parameters and Response Spectra. Bulletin of the Seismological Society of America, 95(6), 2272–2282. <https://doi.org/10.1785/0120050072>
- García-de la Huerta, F. J. L. (2023). *Estudio de la envolvente en el tiempo considerando la sismicidad de tipo subductiva en Chile para la generación de curvas de atenuación* [Memoria de licenciatura, Universidad de Chile facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Civil]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/195372>.
- Goel, R. K., & Chopra, A. K. (1997). Period Formulas for Moment-Resisting Frame Buildings. Journal of Structural Engineering, 123(11), 1454–1461. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:11\(1454\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:11(1454))
- González-Partida, E., Camprubí, A., Canet, C., & González-Sánchez, F. (2008). Fisicoquímica de salmueras e hidrocarburos en cuencas petroleras y en depósitos minerales tipo Mississippi Valley y asociados. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 60(1), 23–42.
- Heath, D. C., Wald, D. J., Worden, C. B., Thompson, E. M., & Smoczyk, G. M. (2020). A global hybrid VS30 map with a topographic slope-based default and regional map insets. Earthquake Spectra, 36(3), 1–15. <https://doi.org/10.1177/8755293020911137>
- INEGI. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*.
- Jaimes, M. A., & Candia, G. (2019). Interperiod Correlation Model for Mexican Interface Earthquakes, 2019. *Earthquake Spectra*, 35(3), 1351–1365. <https://doi.org/10.1193/080918EQS200M>
- K. Johnson, M. Villani, K. Bayliss, C. Brooks, S. Chandrasekhar, T. Chartier, Y. Chen, J. Garcia-Pelaez, R. Gee, R. Styron, A. Rood, M. Simionato, M. Pagani (2023). Global Earthquake Model (GEM) Seismic Hazard Map (version 2023.1 - June 2023), DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8409647>
- Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Science.

Kijko, A. (2020). Seismic Hazard. In: Gupta, H. (eds) *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10475-7_10-1

López-Jara, I. A. (2016). *Estudio de la generación de espectros medios condicionales utilizando la base de datos de sismos con magnitud de momento igual o superior a 6.5 en Chile* [tesis de licenciatura, Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Civil]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/142077>

McGuire, R. K. (2007). *Probabilistic seismic hazard analysis: Early history. Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 329–338. <https://doi.org/10.1002/eqe.765>

Ocola, L. (2019). *Peligro, vulnerabilidad, riesgo y la posibilidad de desastres sísmicos en el Perú*. Revista Geofísica, (61), 81-125.

Ordaz M. and Salgado-Gálvez M.A. (2020). *R-CRISIS v20 Validation and Verification*. Document. ERN Technical Report. Mexico City, Mexico.

Ordaz, M., & Giraldo Sebastián, S.-G. M. (2021). *R-CRISIS: 35 years of continuous developments and improvements for probabilistic seismic hazard analysis*. Bulletin of Earthquake Engineering, 19, 2797–2816. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01098-w>

Padilla-Sánchez, R. J. (2007). Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 59(1), 19–42. <https://doi.org/10.18268/bsgm2007v59n1a3>

Palma-López, D. J., Jiménez-Ramírez, R., Zavala-Cruz, J., Bautista-Zúñiga, F., Gavi-Reyes, F., Palma-Cancino, D. Y. (2017). Actualización de la clasificación de suelos de Tabasco, México. Agroproductividad, 10(12), 29–35.

Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., & Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW) active and passive methods. The Leading Edge, 26(1), 60–64. <https://doi.org/10.1190/1.2431832>

Ramos-Sánchez, J. A., Díaz, S. A., Mora-Ortiz, R. S., & Polanco-Sotomayor, G. (2024). Optimization of Structural Design in Steel Buildings Based on the Site-Specific Design Spectra of the Mexico Seismic Regulations. Geosciences, 14(2). <https://doi.org/10.3390/geosciences14020032>

Reyes, C., Miranda, E., Ordaz, M., & Meli, R. (2002). Estimación de espectros de aceleraciones correspondientes a diferentes periodos de retorno para las distintas zonas sísmicas de la ciudad de México. Revista de Ingeniería Sísmica, 66, 95–121.

Rodríguez-Lomelí, A. G., & García-Mayordomo, J. (2019). Seismic hazard at a triple plate junction: the state of Chiapas (México). Natural Hazards, 97, 1297–1325. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03710-4>

- Ruiz-Sibaja, J. A., Godínez-Domínguez, E. A., Díaz-Alvarado, S. A., Pereyra-Roblero, O. E. (2023). *Assessment of the seismic vulnerability of housing in Siltepec, Chiapas (Mexico)*. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras* 28(2), 140-160. <https://doi.org/10.24133/88b9s715>
- Schmidt-Díaz, V. (2011). Ecuaciones predictivas del movimiento del suelo para América Central, con datos de 1972 a 2010. *Revista Geológica de América Central*. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0256-70242014000100001#1
- Senior Seismic Hazard Analysis Committee. (1997). *Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts*.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), & Secretaría de Comunicaciones, Asentamientos y Obras Públicas (SCAOP). (2013). *Atlas de peligro por fenómenos naturales del estado de Tabasco*.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2004). Carta Geológico-Minera Frontera E15-5 [Mapa]. https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/105_E15-5_GM.pdf
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2005). Carta Geológico-Minera Villahermosa E15-8 [Mapa]. https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/106_E15-8_GM.pdf
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2006). Carta Geológico-Minera Tenosique E15-9 [Mapa]. https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/113_E15-9_GM.pdf
- Tapia-Hernández, E., Reddy, E. A., Oros-Avilés, L. J. (2017). *Retos e incertidumbres en la predicción y prevención del riesgo sísmico*. *Revista de Ingeniería Sísmica* 96, 66-87.
- Tarback, E. J., Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra una introducción a la geología física*. Pearson Educación.
- Torres-Álvarez, C. R. (2015). Determinación de espectros de diseño sísmico mediante análisis de peligro sísmico. *Geotecnia*, 237, 20–25.
- Urquiza-Quiroz, C. O. (2020). Estudio geofísico por el método de refracción sísmica, MASW 1D, MASW 2D y MAM para el diseño estructural del puente Cantuta-región de Junín [Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/11100>
- Zamudio-Zavala, P. E., Gómez-Mora, I., & Mayoral-Ruiz, P. A. (2021). Zonificación sísmica del municipio de Puerto Vallarta, Jalisco. XXX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica, 121–128.
- Zavala-Cruz, J., Jiménez Ramírez, R., Palma-López, D. J., Bautista Zúñiga, F., & Gavi Reyes, F. (2016). Paisajes geomorfológicos: base para el levantamiento de suelos en Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 161–171.
- Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H. K., Somerville, P. G., Fukushima, Y., & Fukushima, Y. (2006). Attenuation Relations of Strong Ground

Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period. Bulletin of the Seismological Society of America, 96(3), 898–913. <https://doi.org/10.1785/0120050122>

Zúñiga, F. R., Suárez, G., Figueroa-Soto, Á., & Mendoza, A. (2017). A first-order seismotectonic regionalization of Mexico for seismic hazard and risk estimation. Journal of Seismology, 21, 1295–1322. <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9666-0>

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.