



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Sismicidad y Mecanismos de Ruptura en el Suroeste del
Golfo de México.

TESIS

que para obtener el título de FÍSICO

presenta:

JOSÉ ANTONIO BAYONA VIVEROS

Asesor de tesis: Dr. Luis Quintanar Robles

ENERO 2013

Índice general

Resumen	4
1. Introducción	6
1.1. El Estado de conocimiento actual en Sismología	6
1.1.1. Clasificación de Ondas Sísmicas	7
1.1.2. Mecanismos focales	11
1.1.3. Esfuerzos de tipo compresional y dilatacional	16
1.1.4. Tectónica de Placas	18
1.2. Actividad Sísmica en México	20
1.2.1. Subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa de Norteamérica	21
2. Antecedentes	23
2.1. Cronología de los principales sismos que han sacudido latitudes medias en México.	23
2.2. Sismicidad característica del Golfo de México	24
2.2.1. Terremoto de Quimixtlán de 1920	25
2.2.2. Terremoto de Orizaba de 1973	25
2.3. Planteamiento del problema	28
2.4. Hipótesis	28
2.5. Objetivos	28
2.5.1. Objetivos generales	28
2.5.2. Objetivos particulares	29
3. Metodología	30
3.1. Compilación de los registros de sismicidad con epicentros en el estado de Veracruz	30
3.2. Creación de cartas epicentrales	31
3.2.1. Carta Epicentral Antigua	31
3.2.2. Carta Epicentral Moderna	31

3.2.3. LA Carta Epicentral	32
3.3. Elaboración de Perfiles	32
3.4. Creación de la base datos para análisis de mecanismos de ruptura	35
3.5. Aplicación del software para la lectura de polaridades y amplitudes de fase de ondas S y P.	35
3.5.1. Análisis de <i>polaridades</i> de las señales	35
3.5.2. Análisis de <i>amplitudes</i> de las señales	36
3.6. Correlación de mecanismos con la distribución de sismicidad	37
4. Resultados	38
4.1. LA Carta Epicentral del estado de Veracruz	38
4.2. Perfiles en territorio veracruzano	38
4.3. La base de datos	44
4.4. Mecanismos focales en el estado de Veracruz	45
4.5. Distribución espacial de mecanismos focales en superficie	51
4.6. Distribución espacial de mecanismos focales normales en perfil III	54
5. Discusiones y conclusiones	55
5.1. La actividad sísmica en el estado de Veracruz	55
5.2. El Reactor Nuclear de Laguna Verde	59

Agradecimientos

Los imposibles de hoy serán los posibles de mañana, es la frase de Konstantin Tsiolkovski en la que cada uno de los miembros del jurado me ha permitido creer a través de su ejemplo. Por medio estas líneas, no sólo agradezco a ustedes el perfeccionar este proyecto, sino también las enseñanzas que a lo largo del tiempo he recibido de ustedes. Te agradezco Miguel, por apoyarme en este paso tan importante para mí. Confío en que tus observaciones serán de gran utilidad para mi carrera. Gracias Pati, por enseñarme que la física no sólo es apasionante; también puede ser divertida. Juan Carlos, gracias por el profesionalismo y entrega que ofreces en tus cursos, así como la disponibilidad y paciencia que presentas ante tus estudiantes. Muchas gracias Raúl, por el gran apoyo que me has brindado a pesar del poco tiempo que nos conocemos. Me esforzaré por cumplir las expectativas que como profesor tienes sobre mí. A ti Anne, te agradezco todo lo que aprendido de ti, gracias por ser un modelo a seguir. René, gracias por hacer de mí una mejor persona. De ti no sólo aprendí mecánica; aprendí que en esta vida no hay tiempo ni lugar para aburrirse, a sorprenderme por el color rojo de las hojas de otoño y a no dejar de maravillarme por las experiencias de vida de la gente. Sin duda, son lecciones que sólo un padre puede enseñar. Finalmente, te agradezco a ti Luis por haber confiado en mí y en este proyecto. Por tu paciencia, dedicación y permanente apoyo, muchas gracias. Asimismo, quiero agradecer de manera especial a Alfredo Galindo por depositar su confianza en mí. Él no sólo me permitió vivir mi primera experiencia profesional, sin querer también provocó que yo me atreviera a vivir experiencias que antes no me había permitido disfrutar por falta de oportunidades o por inseguridades. Agradezco también a Víctor E., Casiano J., Delia Bello y a Jaime Yamamoto por la ayuda y asesoría que me brindaron para desarrollar del presente trabajo de investigación. De igual modo, quiero agradecer a las mujeres de mi familia, que con su apoyo incondicional y su gran amor; me han permitido estar en este momento dedicándoles estas palabras. Muchas gracias Jessica, Lola y Toni. Por otro lado, me permito agradecer a aquellos amigos que junto conmigo, disfrutaron de aprender física. Hoy, las desveladas, los cafés, los cigarrillos, las interminables horas de estudio, las risas, las frustraciones, el nerviosismo previo a los exámenes y las interminables horas en nuestra querida *atalaya* han rendido un fruto más. Muchas gracias Fer, Pam, Alex, Rodrigo, Ito, Elisa Romero, Judith, Leyla, Manik, Adrián, Alexis, Sueli y Elisa Rodríguez, por hacer de mi estancia en la universidad, un hermoso recuerdo. Ahora, no por el hecho de no haber estudiado física; dejaré de agradecer a mis hermanos que, con risas, problemas, lágrimas, pláticas, discusiones y mucho amor; han moldeado al *Toño* que soy en este momento. Soy un hombre feliz de haber encontrado en Roy, Pau, Tha, Ale, Selma y Yun; los hermanos que siempre deseé. ¡Muchas gracias geminises! Finalmente, agradezco con todo el corazón a las personas que llenan de luz mi existir. A Adriana, a Lalo y a Ricardo, no sólo les dedico este proyecto, les dedico todo lo que soy.

Resumen

Una caracterización de la actividad sísmica en el estado de Veracruz fue realizada. Dicha caracterización encuentra sus orígenes en la base de datos del Servicio Sismológico Nacional de la UNAM, la cual cuenta con 2384 eventos sísmicos registrados entre el 15 de Enero de 1974 y el 26 de Agosto del 2012 en esta región.

Con esta información, la realización de tres cartas epicentrales fue viable: la Carta Epicentral Antigua, en la que se graficaron los epicentros de 2151 sismos registrados entre el 15 de Enero de 1974 y el día 24 de Enero de 2006 y donde la mayoría de éstos, dadas las ahora limitadas condiciones de los instrumentos; no cuentan ni con una magnitud sísmica bien definida ni con una profundidad determinada, la Carta Epicentral Moderna; la cual muestra graficados 233 epicentros de eventos detectados entre el 4 de Febrero de 2006 y el 26 de Agosto de 2012, y LA Carta Epicentral del estado de Veracruz que presenta datos de estas dos Cartas Epicentrales antes mencionadas. Todos estos datos a los que se hace referencia, son sismos que tienen en común poseer una magnitud y una profundidad definida y suman un total de 1119 eventos sísmicos que fueron detectados en terreno veracruzano entre el 3 de Enero de 1988 y el día 26 de Agosto de 2012.

Una vez obtenidas estas cartas; se elaboraron tres perfiles o cortes en el plano X-Z, para determinar la distribución de hipocentros o focos en el estado. El perfil I (Figura 4.3), muestra un cúmulo muy superficial de focos sísmicos, mientras que, en el perfil II; se observa una acumulación de hipocentros unos kilómetros más profundos (Figura 4.4). Finalmente, en el perfil III (Figura 4.5) se aprecia una densa acumulación de focos a profundidades de entre 120 y 180 kilómetros, particularidad que resultó interesante para los propósitos del presente trabajo de investigación.

Asimismo, a partir de la extensa base de datos del SSN; se extrajeron los eventos registrados en Veracruz entre el día 4 de Febrero de 2006 y el 26 de Agosto de 2012, que tuviesen una magnitud mayor o igual a 4.5 grados, para determinar sus correspondientes mecanismos focales. Al ser esta cantidad una medida directa de la energía liberada por estos eventos; el detalle de los sismogramas sería el adecuado para poder llevar a cabo dicho análisis. Cabe mencionar que fueron 24 los eventos que satisficieron esta condición, los cuales están debidamente reportados en la Tabla 1 (Figura 4.6). Haciendo uso del programa SEISAN para Windows Vista; se leyeron digitalmente 2244 sismogramas y se analizaron las señales de dos maneras distintas para determinar dichos mecanismos de ruptura:

El análisis de polaridades consistió en señalar la polaridad del primer arribo de ondas primarias. Por convención, si esta primera señal tuviese una polaridad positiva (hacia arriba); el terreno sobre el que se encuentra la estación que detectó el sismo, habría de sufrir una compresión mientras que, si la polaridad es negativa (hacia abajo); una dilatación.

Por otro lado, el análisis de amplitudes consistió en determinar la amplitud de la onda P en la componente vertical y la amplitud de la onda SH en las componentes vertical y transversal de un nuevo sistema de coordenadas. Esta nueva configuración fue el producto de la rotación de ejes del viejo sistema coordinado arriba-abajo, norte-sur, este-oeste que dio origen al nuevo sistema con componentes vertical, radial y transversal.

Una vez señaladas las amplitudes y polaridades; se implementó el uso de softwares llamados Hash y Focmec para determinar los mencionados mecanismos de ruptura. Por un lado, el parámetro de entrada de Focmec fue la polaridad de ondas P y la ubicación geográfica de estaciones sísmicas mientras que, por el otro; Hash empleó las amplitudes de las ondas P y SH. Todos los resultados fueron mostrados en redes estereográficas, y al compararlos; se observan consistencias indiscutibles entre ambos métodos.

Como se esperaba, se obtienen mecanismos focales de tipo normal a profundidades importantes y mecanismos inversos y de tipo strike-slip a profundidades medias y someras (Tablas 1 y 2). De igual modo, la mayoría de mecanismos focales normales y de corrimiento de rumbo se observan en las zonas sur y centro-sur del estado, mientras que los mecanismos focales en donde dominan los regímenes tectónicos compresionales, se reportan en la región centro-norte del mismo (Figuras 4.13, 4.14 y 4.15).

Al determinar la distribución en perfil de once mecanismos focales en donde dominan los regímenes tectónicos de tipo tensionales (Figura 4.16); se observó que, como han documentado Melgar y Pérez-Campos (2010) y Pardo y Suárez (1995); lejos de la trinchera, importante actividad sísmica se localiza por debajo de la interfase entre el slab y el manto.

Asimismo, por medio de un diagrama de roseta se pudo determinar que, en promedio; la dirección del eje principal de tensión de estos eventos está orientado en la dirección **este-oeste** y tiene una inclinación de **40°** con respecto a la horizontal (Figura 5.2).

Una aportación importante es que, dada la Figura 4.13; se han registrado más eventos compresionales en la costa suroeste del Golfo de México, que los reportados por Suárez (2000). Finalmente, se concluye que; a pesar de años de valiosa información; no se tiene un dictamen final sobre posibles riesgos significativos a la población mexicana por la presencia del Reactor Nuclear de Laguna Verde en esta zona de estudio. Por un lado, aunque la actividad sísmica en esta región es muy poco intensa y prácticamente es no frecuente; es muy superficial. En otras palabras, la actividad catalogada como de moderada a baja es compensada por la superficialidad de la misma, por lo que esta incógnita es aún un tema abierto a la investigación, el cual debería ser desarrollado mediante la recopilación de datos durante muchos más años para poder descartar cualquier posibilidad.

Capítulo 1

Introducción

1.1. El Estado de conocimiento actual en Sismología

En la realidad actual, la inversión monetaria y de mano de obra requerida para la implementación de tecnologías en perforación de suelos; es absolutamente exorbitante. Las profundidades máximas alcanzadas por estas maquinarias de uso pesado, son del orden de 12 kilómetros, cantidad longitudinal que resulta despreciable en comparación con los 6371 kilómetros que comprende el radio terrestre promedio [7]. Si se pensase al respecto, sería natural concluir que habrían de proponerse métodos alternativos para estudiar el interior de la Tierra, pues la existencia de la corteza, del manto, y del núcleo; es un tema de dominio público. En este sentido, es la sismología la herramienta primaria que ha sido empleada para el estudio indirecto del interior del planeta, pues al analizar la información proporcionada por los gráficos llamados *sismogramas*; se puede mapear el interior terrestre y estudiar la distribución espacial de ciertas propiedades físicas.

La ya mencionada existencia de la corteza baja, del manto profundo, del núcleo externo y del núcleo interno; por ejemplo; es inferida a partir de las variaciones de la velocidad de las llamadas ondas sísmicas en función de la profundidad. Por otro lado, las ideas sobre la composición química de cada una de estas capas, incluidas las presuntas localizaciones de cambios en las estructuras mineralógicas debido al incremento de la presión con la profundidad; se basan en datos sísmicos también. Asimismo; cerca de la superficie; la sismología provee imágenes detalladas de la corteza que revelan información importante acerca de la localización de recursos económicos tales como petróleo y/o minerales.

La sismología es también el principal método para estudiar y entender la dinámica y evolución de la Tierra, incluyendo los movimientos convectivos del manto, responsables del desplazamiento de las placas tectónicas en superficie, y cuya interacción es el origen de la actividad sísmica en el planeta [18]. Pero, ¿qué estudia un sismólogo para concluir todo eso?

Toda la información prometida, puede ser obtenida a partir del análisis de la polaridad, amplitud, tiempo de llegada, etcétera de tres diferentes tipos de ondas que emanan de una fuente puntual de ondas sísmicas llamada hipocentro, cuyas descripciones requieren de ciertas definiciones básicas.

1.1.1. Clasificación de Ondas Sísmicas

Así como las ondas de luz son reflejadas y transmitidas por una superficie semireflectora; las ondas sísmicas se reflejan y transmiten en interfases al interior de la Tierra en donde las propiedades físicas cambian. En esta misma analogía; las ondas sísmicas también experimentan el fenómeno de la refracción cuando inciden en un medio en donde la densidad varía como función de alguna componente espacial.

De este modo, la reflexión, transmisión o refracción de una onda sísmica dependerá de su ángulo de incidencia, las propiedades físicas del medio y de su naturaleza oscilatoria:

Ondas Primarias

Las ondas P u ondas primarias son oscilaciones de tipo longitudinal (aquéllas cuyo vector dirección de propagación apunta en la misma que el vector dirección de perturbación) que se propagan por medios sólidos y líquidos comprimiendo y dilatando el espacio. Reciben el nombre de ondas primarias pues, dadas sus velocidades características; son las primeras en ser registradas por los instrumentos después de un evento sísmico, es decir; dentro de la clasificación de ondas sísmicas; éstas son las que se desplazan más rápidamente al interior de la Tierra.

Ondas Secundarias

Son también llamadas ondas S y se refieren a movimientos oscilatorios de tipo transversal (el vector dirección de perturbación de la onda es ortogonal al vector de dirección de propagación de la misma) que exclusivamente se propagan a través de medios sólidos, pues se disipan rápidamente al atravesar un medio líquido. Este tipo de ondas son las segundas en ser detectadas y justamente la etiqueta *S*, encuentra su explicación en este razonamiento. El desplazamiento de las partículas en el terreno durante el paso de la onda puede ser en cualquier dirección perpendicular a la de propagación; pero, a veces, pueden desplazarse en una única dirección, en cuyo caso se dice que las ondas están *polarizadas*. De este modo, la componente vertical de la onda S se denota a menudo por SV, mientras que la componente horizontal se denota por SH.

Ondas Superficiales

Cuando las ondas internas llegan a la corteza, se generan las ondas superficiales, las cuales se propagan por la superficie de discontinuidad de la interfase de la superficie terrestre (litósfera-atmósfera y litósfera-hidrosfera). Por esta razón, reciben ese nombre.

Estas ondas se caracterizan por ser las más destructivas y por poseer menor velocidad de propagación en comparación con las otras dos. A su vez, estas formas de movimiento oscilatorio; se han clasificado en dos tipos: Ondas de Love y Ondas de Rayleigh. Las ondas de Love son ondas superficiales que producen un movimiento horizontal de corte en superficie, mientras que las ondas de Rayleigh son ondas que producen un movimiento elíptico retrógrado del terreno.

Dos figuras ilustrativas, se muestran a continuación:

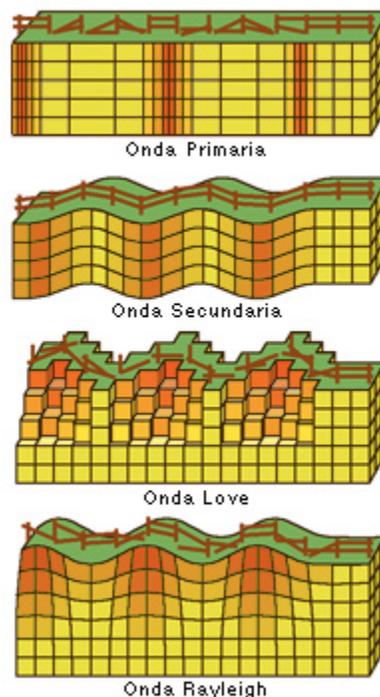


Figura 1.1: Propagación de los diferentes tipos de ondas sísmicas a través de un medio sólido. Imagen tomada de [2].

La Figura 1.1, muestra la deformación que sufre el terreno por ser el medio en el que se propagan las ondas sísmicas. Se aprecia que las ondas superficiales son las más devastadoras dado el complejo modo de oscilación por el que se caracterizan.

Por otro lado, en la Figura 1.2 se puede visualizar cómo son los trayectos recorridos por estas ondas. Mientras que las Ondas Superficiales se desplazan por la corteza hasta llegar al detector; las Ondas P y S viajan por el interior de la Tierra y, de acuerdo al ángulo de incidencia y a los cambios de densidad con la profundidad; serán reflejadas, transmitidas o refractadas hasta llegar a la superficie en donde serán detectadas.

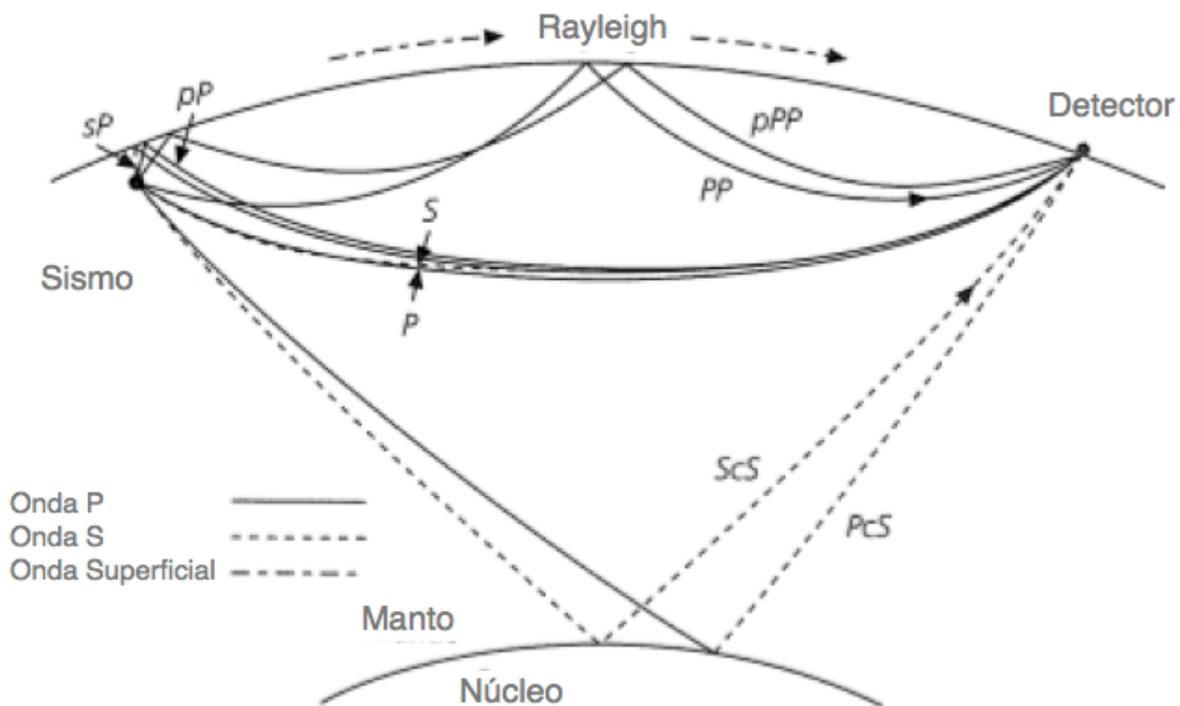


Figura 1.2: Representación de los viajes emprendidos por los tres diferentes tipos de Ondas Sísmicas. Imagen modificada de [18].

Ahora, dadas las descripciones de los movimientos oscilatorios de tipo sísmico; es válido preguntar: ¿Cómo es posible estudiarlos?

Para dar seguimiento a esta interrogante; se afirma que cada país cuenta con su propia red sismológica, la cual está compuesta por un determinado número de estaciones. En cada una de ellas, se encuentran instrumentos de detección previamente introducidos como sismómetros, cuyo principio físico de funcionamiento es la inercia y cuya utilidad radica en proporcionar un sismograma para cada componente del espacio. Un sismograma es un gráfico en donde se muestra la variación de la velocidad del suelo en función del tiempo.

En la Figura 1.3, se aprecia un ejemplo de este tipo de diagramas:

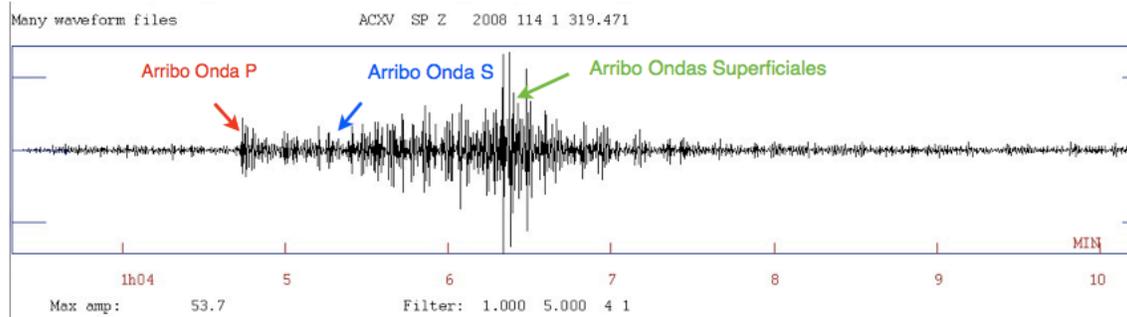


Figura 1.3: Componente vertical de un sismograma real. Se muestra el registro de un evento ocurrido cerca de Minatitlán, Veracruz en Enero de 2008 detectado por la estación ACXV.

Un sismólogo experimentado habrá de determinar, en buena aproximación; cuál es el tiempo de arribo de las Ondas P, las Ondas S, y las Ondas Superficiales, así como la polaridad y/o amplitud de estas señales. Esta información será útil para conocer cuál es el mecanismo de ruptura involucrado en el fenómeno estudiado.

Podría resultar natural que el lector se formule la pregunta: ¿Qué es un mecanismo de ruptura?, y para responderla; se dedicará el siguiente subcapítulo.

1.1.2. Mecanismos focales

La geometría de las fallas, es inferida a partir de un modelo tridimensional de ondas sísmicas. La Figura 1.4 ilustra un mecanismo focal denominado *transversal izquierdo*, en donde una placa tectónica se desplaza horizontalmente con respecto a alguna otra placa con la que estuviese interactuando. Esta acción libera energía en forma de ondas sísmicas que se propagan en todas direcciones. En algunas direcciones, el terreno experimenta alejamiento de la fuente como primer movimiento (se mueve hacia la estación sísmica), mientras que en otras parece acercarse a la fuente (alejándose del detector):

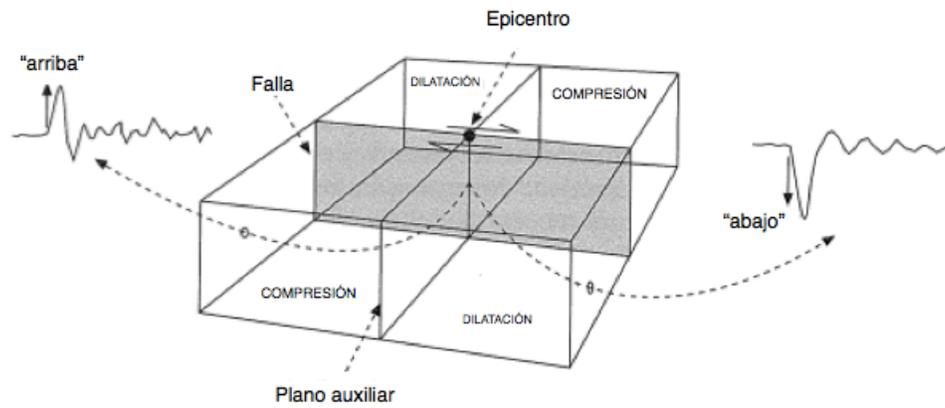


Figura 1.4: Primeros registros de las Ondas P observados en sismómetros localizados en direcciones distintas que permiten determinar la orientación y dirección de la falla involucrada en la presencia del evento sísmico en estudio. Imagen modificada de [18].

En este sentido, existen ciertos métodos para determinar dicha geometría, dos de los cuales fueron implementados en la realización del presente trabajo de investigación y cuyas generalidades son descritas en seguida:

Análisis de polaridades de ondas P

Bajo la tesis antes expuesta; los sismogramas difieren entre una estación y otra. En el cuadrante *de acercamiento* (llamado compresional), el primer movimiento del terreno registrado es acercándose al detector, mientras que en el cuadrante *de alejamiento* (llamado dilatacional); el primer movimiento detectado parece alejarse del instrumento.

Dado que las ondas sísmicas descienden desde la fuente, se refractan y arriban a una estación sismológica distante desde abajo; el primer pulso registrado es hacia arriba en un cuadrante compresional y hacia abajo en un cuadrante dilatacional.

Los cuadrantes compresional y dilatacional pueden ser identificados analizando sismogramas registrados en diferentes azimuths alrededor de la fuente sísmica. La orientación de la falla y una superficie perpendicular a ella pueden ser encontradas, porque en esas direcciones; las primeras señales cambian de polaridad. Al encontrar la orientación de la falla; también puede ser determinada la dirección del movimiento.

Análisis de amplitudes de ondas P y ondas SH

Para llevar a cabo dicho análisis es necesario hacer una rotación de ejes, es decir; pasar de un sistema de coordenadas norte-sur, este-oeste, arriba-abajo; a un sistema de coordenadas vertical, radial y transversal. De este modo, al determinar la amplitud de la onda P en la componente vertical y la amplitud de la onda SH (en este nuevo sistema coordenado) en las componentes vertical y transversal; se podrá determinar una razón SH/P que estará relacionada con un *patrón de radiación* que, a su vez; estará determinado por el tipo de fallamiento asociado. Un patrón de radiación es una representación gráfica de las propiedades de radiación de una fuente en función de sus coordenadas espaciales.

Los patrones de radiación de ondas P y S que no puedan ser derivados; se obtienen usando la teoría de ondas sísmicas. Estos patrones se tornan a ser aquéllos que pueden ser generados por un conjunto de fuerzas con una geometría correspondiente. Específicamente, la radiación debida al movimiento sobre el plano de falla es lo que podría ocurrir para un par de fuerzas *dobles*, pares de fuerzas con dirección opuesta y una pequeña distancia comprendida entre ambas. El autor no pretende profundizar en el tratamiento matemático que por su complejidad es tema expuesto a nivel maestría, pero anexa dos referencias para el lector que estuviese interesado en hacerlo: Hardebeck y Shearer (2002) [12] y Hardebeck y Shearer (2003) [13].

Siguiendo cualquier método; es viable apreciar la geometría de la falla haciendo su correspondiente representación estereográfica:

Representación estereográfica del plano de falla

Dicha geometría puede ser encontrada a partir de la distribución de datos sobre la esfera alrededor del foco sísmico. Al ser más fácil graficar sobre un pedazo de papel que sobre una esfera; se emplea una *proyección estereográfica*, la cual transforma un hemisferio en un plano. La construcción gráfica que hace esto es una *estereored*. Sobre esta red, el azimuth (el ángulo con respecto al norte geográfico) es mostrado con valores desde 0° hasta 360° alrededor de la circunferencia. El dip (el ángulo del plano de falla con respecto a la horizontal) muestra valores desde 90° hasta 0° a lo largo de la red del ecuador, tal como se muestra en la Figura 1.5.

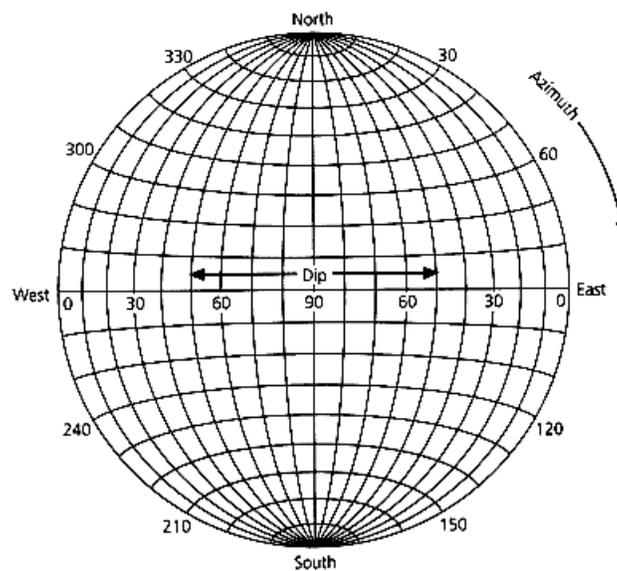


Figura 1.5: Una estereored empleada para graficar un hemisferio sobre una superficie plana. El azimuth es mostrado por los números alrededor de la circunferencia, mientras que el dip; con los números a lo largo del Ecuador. Imagen tomada de [18].

Para ver cómo usar esta red, supongamos que tenemos un plano de falla descrito por un azimuth de 80° y un $\text{dip} = 30^\circ$: Se cuentan los 80° grados desde el norte siguiendo el sentido de las manecillas del reloj, se marca esta posición y se rota la red hasta que ésta se encuentre ahora en el norte. En seguida, se cuentan 30° desde el extremo derecho del Ecuador hacia el centro y se traza el meridiano (la curva que va desde arriba hacia abajo) que contenga ambos puntos.

Asimismo, es posible graficar planos perpendiculares a este plano de falla, también llamados *planos auxiliares*. Para hacerlo, se rota la estereored de tal modo que el plano coincida con algún meridiano y se localiza el punto sobre el Ecuador a 90° que intersecte el plano con éste último. Este punto es el *polo* para el plano, pues representa el punto en el cual la normal al plano intersecta a la esfera. cualquier plano perpendicular al primer plano contiene a la normal, y por lo tanto; debe pasar a través del polo.

Una vez que se ha aprendido a emplear estas proyecciones estereográficas; es pertinente introducir al lector a los tipos de mecanismos focales que pueden ser estudiados en ellas, así como mostrarle cómo lucen dichas estereoredes, conocidas comúnmente en el ambiente sísmológico como *pelotas de playa*, las cuales se construyen a partir del registro en los sísmogramas como compresiones y dilataciones, y cuyos planos de falla y auxiliar delimitan los cuadrantes de dichas compresiones y dilataciones:

Fallamiento transcurrente

Este tipo de fallamiento es aquél que fue discutido en la primera parte de esta sección. Resulta importante señalar que existen dos tipos: lateral izquierdo y lateral derecho, de acuerdo al sentido del desplazamiento de las fallas.

Fallamiento normal

Las fallas normales son un producto de esfuerzos tensionales. En este proceso, las placas se desplazan de manera divergente de tal forma que el material por debajo de ellas, encuentra una región en la cual liberar la presión ejercida sobre él dada su profundidad. Este tipo de fallamiento es característico de las zonas de apertura, o *hot spots*.

Fallamiento inverso

Éste es un mecanismo en el que al menos dos placas se desplazan en direcciones con sentidos opuestos y eventualmente convergen en cierta región del espacio. Al hacerlo, habrá una acumulación de esfuerzos compresionales en el tiempo cuya consecuencia será la futura ruptura del terreno. En este proceso, la gravedad juega un papel importante pues, en presencia de un campo gravitatorio; es más probable que la placa más densa ceda, caiga y sea subducida.

La Figura 1.6, sirve para ilustrar sobre los diferentes tipos de fallamiento y sus correspondientes representaciones en redes estereográficas:

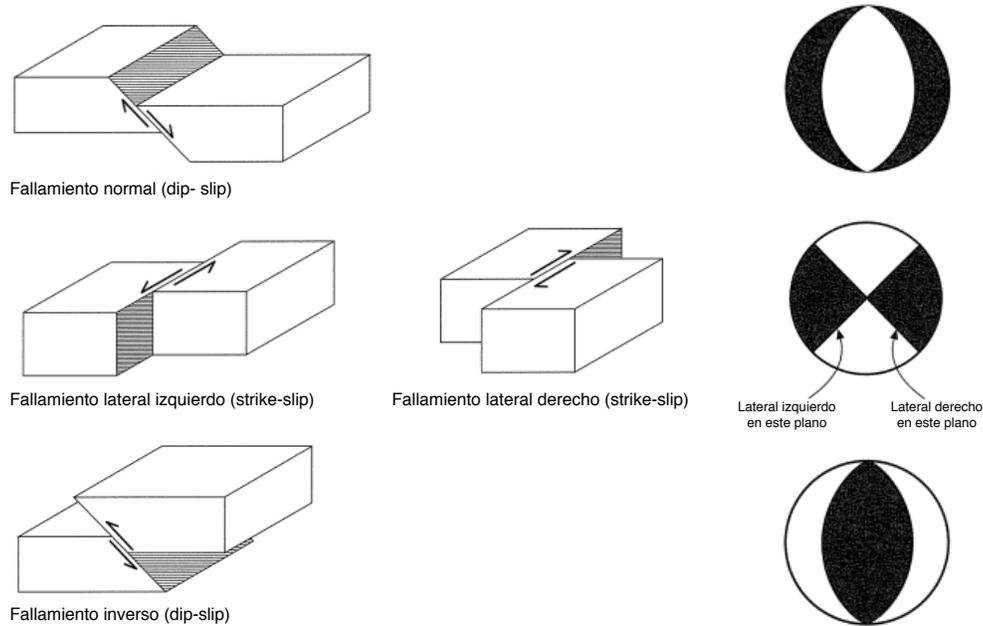


Figura 1.6: Tipos básicos de fallamiento (izquierda) y sus correspondientes pelotas de playa (derecha). Los cuadrantes compresionales se representan en color negro, y los cuadrantes dilatacionales; en blanco. En la primera fila se modela un mecanismo normal, en la segunda; fallamientos laterales izquierdo y derecho y finalmente, en la tercera fila se representa un mecanismo focal de tipo inverso. Imagen modificada de [18].

Haste el momento, se ha aprendido que determinar mecanismos focales, también llamados mecanismos de ruptura; implica localizar el hipocentro, estudiar la geometría de la falla, ubicar el plano de falla y su plano ortogonal y reconocer la dirección del movimiento sísmico. Ahora, a lo largo de esta travesía introductoria; el autor ha mencionado en ciertas ocasiones el término *esfuerzo* y probablemente el lector no está muy familiarizado con él, por lo que será pertinente presentar una revisión general de ese tema antes de continuar.

1.1.3. Esfuerzos de tipo compresional y dilatacional

Existen dos tipos de fuerzas que pueden actuar sobre un objeto. El primero es una *fuerza de cuerpo*, la cual actúa en cualquier lugar dentro del cuerpo, resultando una fuerza neta proporcional a su volumen. Un ejemplo familiar de estas fuerzas es la experimentada debido a la acción de la gravedad \mathbf{g} .

Un segundo tipo de fuerza es una *fuerza de superficie*, que actúa en la superficie de un objeto cuya fuerza neta es proporcional al área de dicho cuerpo. Por ejemplo, un cuerpo en un recipiente que contiene cierto fluido es sujeto a una presión igual al peso por unidad de superficie del fluido sobre dicho cuerpo. En cualquier punto sobre su superficie, la presión apunta sobre la normal a su área. Ahora, considérense N fuerzas actuando sobre un pequeño volumen V , con superficie S , dentro de un medio continuo. El material dentro de V se ve afectado por las fuerzas de cuerpo que actúan en cada punto y por las fuerzas de superficie que actúan sobre su área, debido al material que se encuentra afuera. Si una fuerza F actúa sobre cada elemento diferencial dS , cuyo vector ortonormal es \vec{n} ; se define el vector de tracción σ como el límite de fuerza de superficie por unidad de área en cualquier punto:

$$\sigma(\vec{n}) = \lim_{dS \rightarrow 0} \frac{F}{dS} \quad (1.1)$$

El sistema de fuerzas de superficie que actúan sobre un volumen es descrito por tres vectores de tracción. Cada uno lo hace sobre una superficie perpendicular a un eje coordenado, por lo que es paralelo al plano definido por los otros ejes. Al ser tridimensional el espacio físico, se tiene un conjunto de nueve términos que describen la fuerza de superficie que puede ser agrupado en un tensor de esfuerzos σ_{ij} :

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

A las tres componentes de la diagonal del tensor: σ_{11} , σ_{22} y σ_{33} ; se les conoce como *esfuerzos normales*, mientras que las seis restantes, son conocidas como *esfuerzos cortantes*.

Ahora, es importante recalcar que la convención de signos para las componentes viene de la relación establecida entre el vector normal perpendicular a la superficie y los vectores base del espacio vectorial empleado. La Figura 1.5 muestra las componentes positivas del tensor de esfuerzos que actúan sobre un cubo con caras perpendiculares a los ejes coordinados.

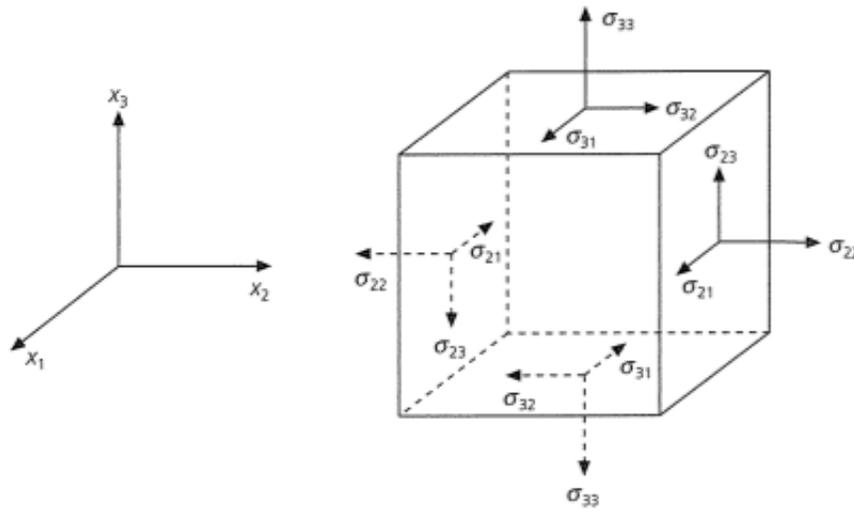


Figura 1.7: Componentes del tensor de esfuerzos que actúan sobre un cubo. Imagen tomada de [18].

Esta figura muestra que los esfuerzos normales positivos tienden a expandir el volumen, mientras que los esfuerzos normales negativos hacen del volumen más pequeño. De este modo, los valores positivos de la tracción normal corresponden a **tensión**, y los valores negativos de la tracción normal; corresponden a **compresión**.

En este sentido, los geofísicos frecuentemente hablan sobre *máximos y mínimos esfuerzos compresionales y dilatacionales*, al referirse a los valores más y menos negativos de dichas componentes, respectivamente.

Para finalizar esta breve descripción; es elemental señalar que la determinación de mecanismos focales debe ser empática con la Teoría de la Tectónica de Placas, cuyos rasgos más generales e importantes son descritos en seguida.

1.1.4. Tectónica de Placas

Esta teoría también es conocida como Teoría de Wegener y considera que la litósfera está dividida en varios grandes segmentos relativamente estables de roca rígida, denominados *placas* que se extienden por el globo terraqueo como caparzones curvos sobre una esfera. Cada placa se desliza en movimiento relativo a la vecina, y la consecuencia de la interacción en superficie es la actividad sísmica en el mundo. En esta teoría se argumenta con datos experimentales como la determinación de epicentros y predice la existencia de siete grandes placas tectónicas como la Placa del Pacífico y varias más pequeñas como la Placa de Cocos, cuyas citas serán cada vez más frecuentes más adelante.



Figura 1.8: Distribución espacial de placas tectónicas en el planeta. Imagen tomada de [5].

De igual modo, la Teoría predice que estos bloques que forman el *rompecabezas* llamado corteza; descansan sobre una capa de roca caliente y flexible denominada astenósfera, que fluye lentamente. Los geólogos aún no han determinado con exactitud cómo interactúan estas dos grandes capas, pero las teorías más vanguardistas afirman que el movimiento del material espeso y fundido de la astenósfera fuerza a las placas superiores a moverse, hundirse o levantarse.

El concepto básico de la teoría de la tectónica de placas es simple: los fluidos más calientes ascienden mientras que los fluidos más fríos descienden. He aquí el porqué: Supóngase dos fluidos A y B contenidos en un mismo recipiente donde A se encuentra a una temperatura mayor que B. La hidrostática puede asegurar que el fluido A flotará por encima del fluido B pues al poseer una mayor temperatura; posee una mayor energía interna, por lo que sus partículas constituyentes oscilarán con amplitudes mayores que las del fluido más frío. De este modo, el reflejo macroscópico de este fenómeno se traducirá en una menor densidad de masa de A que de B, es decir; habrá menor número de partículas por unidad de volumen en A que en B, por lo tanto A será más liviano que B y flotará.

Si dadas ciertas condiciones del experimento resultase que al flotar A, éste se enfría; entonces volverá a ser igual o más denso que B y volverá a descender. Ahora, si este experimento fuese cíclico, entonces se estarían estudiando corrientes convectivas originadas por un gradiente de temperatura dado.

El mismo principio se aplica a las rocas calientes que están por debajo de la superficie terrestre: el material fundido de la astenósfera baja asciende (por poseer una temperatura mayor que el material ubicado en la astenósfera alta), mientras que la materia fría y endurecida se hundirá cada vez más hacia el fondo. Esta roca que se hunde alcanzará las elevadas temperaturas de la astenósfera profunda, se calentará y comenzará a ascender nuevamente. En este sentido, se puede asegurar que la interacción entre placas tectónicas en superficie está íntimamente relacionada con la dinámica en la astenósfera, pues de acuerdo al principio de isostasia; las cortezas oceánica y continental flotan sobre ella por ser menos densos. Por último, se puede decir que esta teoría puede ser calificada como *unificadora* pues explica la deriva continental, la expansión del suelo oceánico, la existencia de cordilleras o ejes volcánicos paralelos a las trincheras y la estrecha relación entre la actividad volcánica con la actividad sísmica, sin pérdida de generalidad.

1.2. Actividad Sísmica en México

Según los expertos, el principal motor que alimenta la dinámica sísmica en el territorio mexicano, es la interacción de tres placas tectónicas: la Placa Norteamericana, la Placa de Cocos y la Placa de Rivera. En las zonas occidental y sur de México; existe una cantidad considerable de fallas geológicas. Muchas no tienen gran relevancia, dada la baja energía liberada durante sus eventos sísmicos, pero existen algunas otras como la de San Andrés en donde se registran sismos de magnitudes importantes de manera constante. Otras fallas como la del Cañón del Sumidero en Chiapas, no representan un riesgo significativo para la población pero proporcionan factores determinantes en la formación de relieve y ecosistemas. México presenta una gran actividad sísmica en el noroeste del país, pues es ahí en donde se encuentra la Falla de San Andrés, sin embargo; la actividad más intensa y profunda; se reporta en la costa sur del Pacífico Mexicano, pues es en esas latitudes donde se localiza una zona de subducción creada entre la Placa de Cocos y la Placa de Norteamérica llamada *Trinchera Mesoamericana*.

MAT (Middle America Trench) es una gran zona de subducción que cubre desde las costas de Colima; México, hasta Costa Rica pues mide 2750 kilómetros de longitud y cuenta con una extensión cortical de 6669 metros en su punto más profundo (Astiz, Kanamori y Eissler, 1987) [9]. Asimismo, representa la frontera entre las placas Rivera, Cocos y Nazca y entre la Placa de Norteamérica y de la del Caribe.

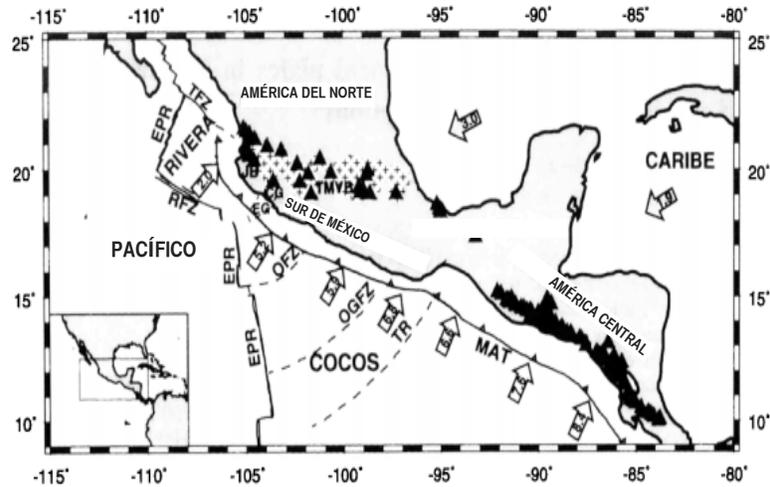


Figura 1.9: Ilustración que representa la interacción de cinco placas litosféricas: la del Pacífico, Rivera, Cocos, la de Norteamérica y la del Caribe. La tasa de convergencia relativa (en cm por año) entre las placas oceánicas y las continentales se representa mediante flechas. Las abreviaciones (por sus nombres en inglés) son EPR: Zona de apertura del Este del Pacífico; TFZ: Zona de Fractura Tamayo, RFZ: Zona de Fractura Riviera; MAT: Trincheira Mesomericana; JB: Bloque de Jalisco; CG: Graben de Colima; EG: Graben El Gordo. Los triángulos negros representan el vulcanismo cuaternario y el área cruzada indica el Eje Volcánico Transmexicano (TMVB). Imagen modificada de Pardo y Suárez (1995).

Para fines convenientes; se restringirá la discusión a esta última zona de estudio y se procederá a exponer sobre los mecanismos focales que intervienen en el fenómeno de interés.

1.2.1. Subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa de Norteamérica

Como se ha recalcado, la actividad más intensa y profunda que caracteriza al territorio mexicano; es consecuencia directa de la subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa Norteamericana, donde el ángulo de entrada aceptado por la comunidad científica, oscila entre los 12 y 15° con respecto a la horizontal (Stoiber y Carr, 1973; Hanus y Vanek, 1978; Havskov, 1982; Burbach, 1984; Bevis e Isacks, 1984; Singh y Mortera, 1991). [17]

Para ilustrar al lector, se presenta a continuación la siguiente figura:

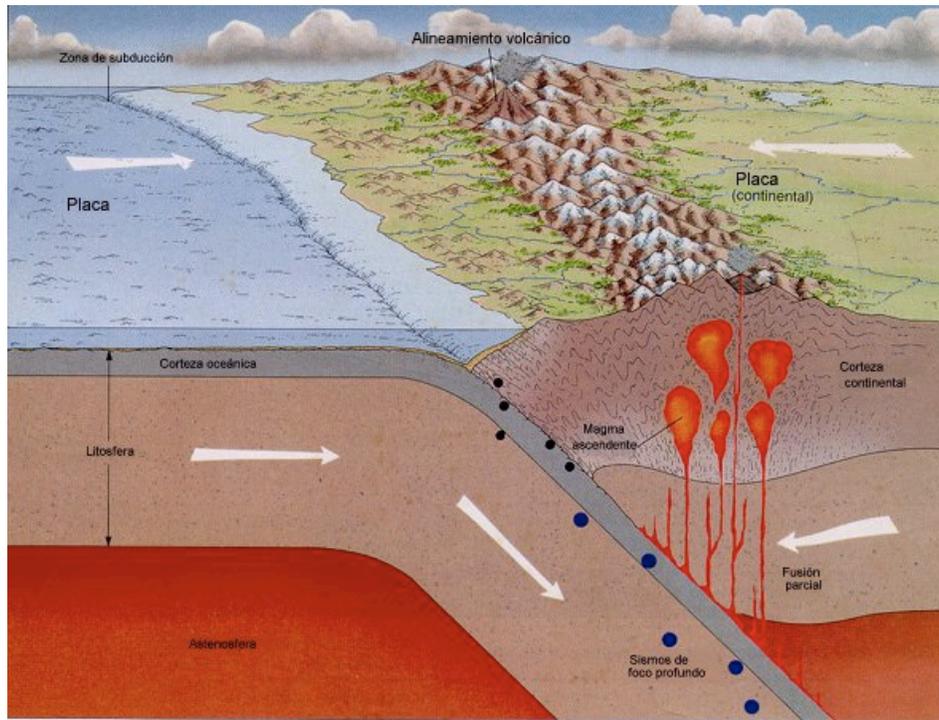


Figura 1.10: Esquema que representa el proceso de subducción experimentado por la Placa de Cocos. Las flechas blancas, representan los movimientos relativos entre placas oceánica y continental. Por otro lado, los puntos negros modelan hipocentros de sismos someros mientras que los azules representan focos sísmicos de eventos profundos. Imagen tomada de [1].

Supóngase que la placa del lado izquierdo es Cocos, la de la derecha es la Placa de Norteamérica, la zona de subducción es la Trincheras Media Americana y el alineamiento volcánico es el Eje Volcánico Transversal. De este modo, ya se cuenta con un esquema claro sobre el fenómeno en discusión. Las placas al estar *pegadas* directamente a esta capa de fluido viscoso llamada astenósfera que experimenta una dinámica convectiva lenta pero constante; son arrastradas en superficie y al converger, acumulan esfuerzos por cierto intervalo de tiempo. La energía almacenada será liberada de manera súbita en las fracturas y se producirá lo que es conocido como *sismo*. Esta interacción entre placas litosféricas se ha traducido en la manifestación de una cantidad altamente significativa de eventos sísmicos sobre territorio mexicano. Once de los más intensos y destructivos de este conjunto; se enlistan y se consideran como antecedentes del presente trabajo de investigación.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Cronología de los principales sismos que han sacudido latitudes medias en México.

1.- **3 de Enero de 1920:** Es el tercer terremoto más mortífero que se haya registrado en México, con una magnitud de entre 6.4 y 8.0 grados, cuyas mayores afectaciones fueron en Quimixtlán y en la Ciudad de Xalapa dejando 650 muertos.

2.- **3 de Junio de 1932:** El terremoto de Jalisco - Colima tuvo una magnitud de 8.5 grados en la escala de Richter, causando 300 muertos, 25 heridos y grandes daños en las poblaciones de los estados de Colima y Jalisco, resultando la Ciudad de Colima, la más dañada.

3.- **28 de Agosto de 1973:** Ha sido el terremoto más fuerte que haya tenido lugar en el estado de Veracruz, el segundo más mortífero y el más intenso en México según el sismógrafo veracruzano. Considerando el número de inmuebles destruídos, se habla de una cifra real total de 3,000 a 4,000 de víctimas.

4.- **19 de Septiembre de 1985:** Un grave terremoto de 8.1 grados en la escala de Richter y con epicentro en Michoacán; causa 10,000 fallecidos oficiales, y 45,000, según la Coordinadora Única de Damnificados. El temblor provocó la destrucción de un tercio del total de edificios en la Ciudad de México.

5.- **14 de Septiembre de 1995:** Cuatro muertos dejó un sismo de 7.3 grados en la escala de Richter en el estado de Guerrero.

6.- **9 de Octubre de 1995:** A 61 muertos se elevó el número de víctimas fatales por causa del terremoto de 7.5 en la escala de Richter que provocó daños principalmente en los estados de Colima y Jalisco.

7.- **15 de Junio de 1999:** Un terremoto de magnitud de 6.7 grados en las regiones sur y central de México provoca 18 muertos, más de 200 heridos y al menos 16,000 damnificados. El Estado de Puebla fue el más afectado.

8.- **30 de Septiembre de 1999:** Un terremoto de 7.4 grados en la escala de Richter y con epicentro en el estado de Oaxaca ocasiona la muerte de 39 civiles, medio centenar de heridos y 250,000 damnificados.

9.- **21 de Enero de 2003:** Al menos 29 muertos, 290 heridos y 30,000 damnificados se registraron por causa del terremoto de 7.6 grados Richter que sacudió el oeste y centro del país, con epicentros en el estado de Colima, en la costa del Pacífico.

10.- **10 de Diciembre de 2011:** Un temblor de 6.5 grados Richter provoca tres muertes en el estado de Guerrero y escenas de gran nerviosismo en la Ciudad de México.

11.- **20 de Marzo de 2012:** Un terremoto de 7.8 grados en la escala de Richter sacude el suroeste de México sin información de víctimas ni daños materiales. [8]

Es imprescindible señalar que, dentro de este listado; el primero y tercero son ajenos a la distribución de epicentros seguida por los demás sismos, es decir; mientras que la mayoría se registran en áreas próximas a la costa del Pacífico mexicano, éstos se reportan cerca de la costa del Golfo de México. Este hecho sugiere la existencia de cierta actividad sísmica menos frecuente pero importante en esta zona por lo que, es gusto del autor discutir sobre la actividad de tipo sísmica que caracteriza a la región suroeste del Golfo de México.

2.2. Sismicidad característica del Golfo de México

Tradicionalmente se ha pensado a la comarca del Golfo de México como una zona de baja sismicidad. Sin embargo, existen registros de eventos destructivos en el estado de Veracruz, como los puntos 1 y 3 citados anteriormente; que obligan a los investigadores a replantear los lineamientos a seguir para colocar adecuadamente la etiqueta que describa mejor la sismicidad en esta región.

Para concebir la importancia de estos eventos, se presenta a continuación una descripción más detallada de los mismos:

2.2.1. Terremoto de Quimixtlán de 1920

El terremoto de Quimixtlán, conocido como el *Terremoto de Xalapa*; fue un evento sísmico que tuvo presencia el 3 de Enero, con epicentro localizado en el municipio de Quimixtlán, Puebla. Destruyó casi por completo el municipio, afectando también la capital de Veracruz, Xalapa y algunos otros poblados de Orizaba, Huatusco, Ixtaczoquitlán y Córdoba. Como consecuencia del mismo, hubo entre 650 y 2,000 víctimas según diversas fuentes. Éste ha sido el tercer terremoto más mortífero que se haya registrado en México, después del *Terremoto de 1985* y el *Terremoto de Orizaba de 1973*. [6]

2.2.2. Terremoto de Orizaba de 1973

El terremoto se suscitó durante la madrugada del 28 de Agosto a las 4:53 a.m. con una magnitud de entre 7.3 grados (según SSN) hasta los 8.7 grados en la escala de Richter (según sismógrafo de Veracruz). El epicentro se localizó en el municipio de Ixtaczoquitlán, cerca de Orizaba.

El sismo afectó principalmente la zona centro de Veracruz hasta Ciudad Serdán, con miles de muertos, viviendas, tiendas y edificios destruidos, la destrucción de iglesias importantes en Ixtaczoquitlán como la Iglesia de Santa María de Guadalupe hoy Emperatriz de América, miles de viviendas destruidas en Córdoba, Nogales y Río Blanco, cuarteando el Teatro I. Llave de Orizaba. Todos esos municipios fueron casi destruidos por completo a causa del gran Terremoto. También se produjeron grandes daños en los estados de Puebla y de Morelos, en particular en Ciudad Serdán que además de reportar centenares de muertos; quedó completamente destruida junto con otros municipios del Estado de Puebla.

El saldo de muertos según fuentes es de entre 1,000 y 1,200 muertos, pero considerando el número de edificios y viviendas destruidas; se hablaría de un total de 3,000 a 4,000 como cifra más real de víctimas, el saldo de muertos más grande en la historia del estado de Veracruz y segundo más mortífero en México. [8]

Aunque importantes, estos eventos no son suficientes para generar en el lector una idea intuitiva sobre la sismicidad en el estado. Para hacerlo; se presentan a continuación dos cartas epicentrales, en las cuales se encuentran graficados los eventos sísmicos registrados por el SSN desde Enero de 1974 hasta Agosto de 2012.[15]

Carta Epicentral Antigua del Estado de Veracruz (1974- 2006).

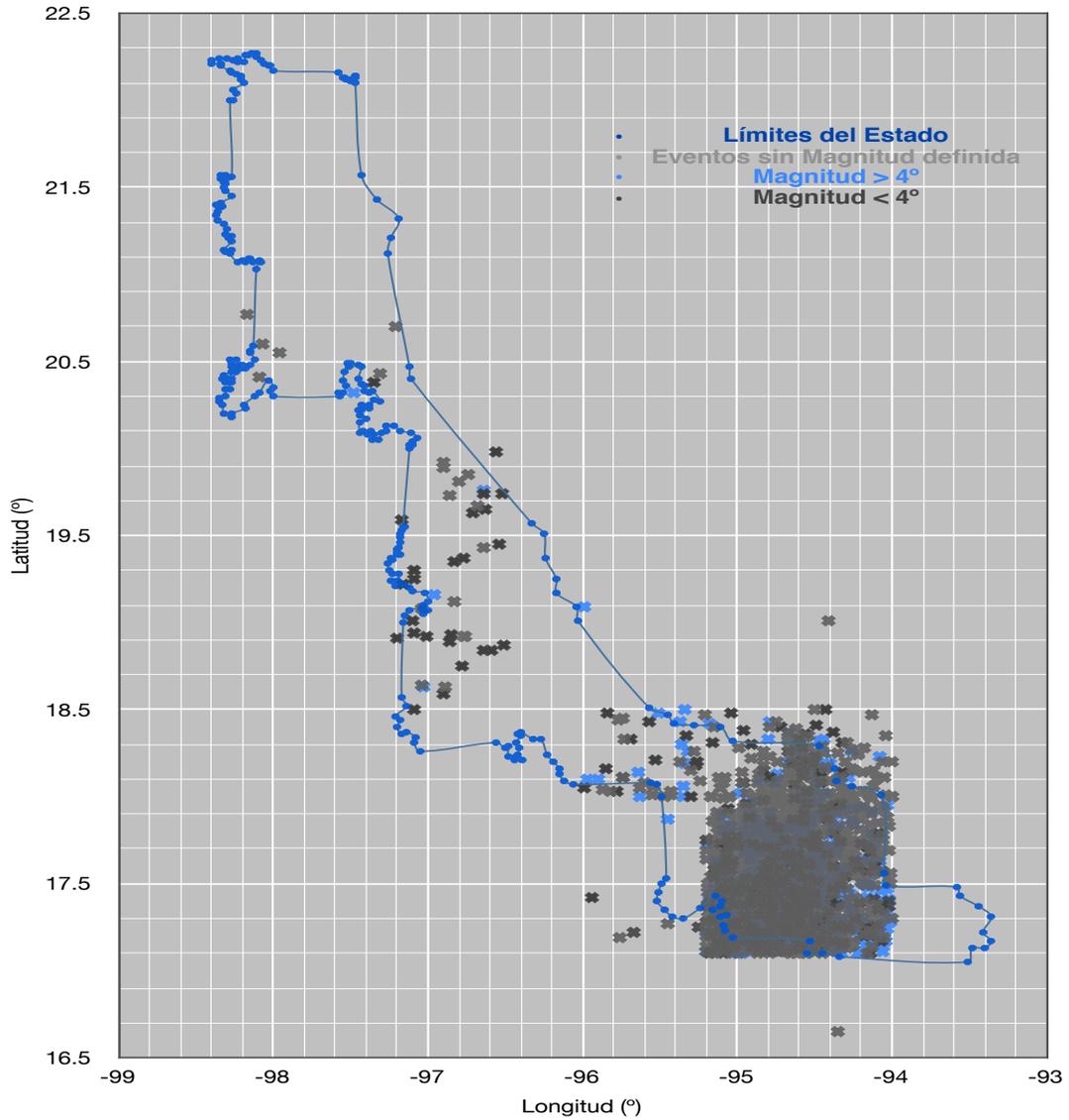


Figura 2.1: Carta Epicentral Antigua del estado de Veracruz. Se muestra la distribución espacial de epicentros de 2151 sismos ocurridos entre el día 15 de Enero de 1974 y el 24 de Enero de 2006.

Carta Epicentral Moderna del Estado de Veracruz (2006-2012).

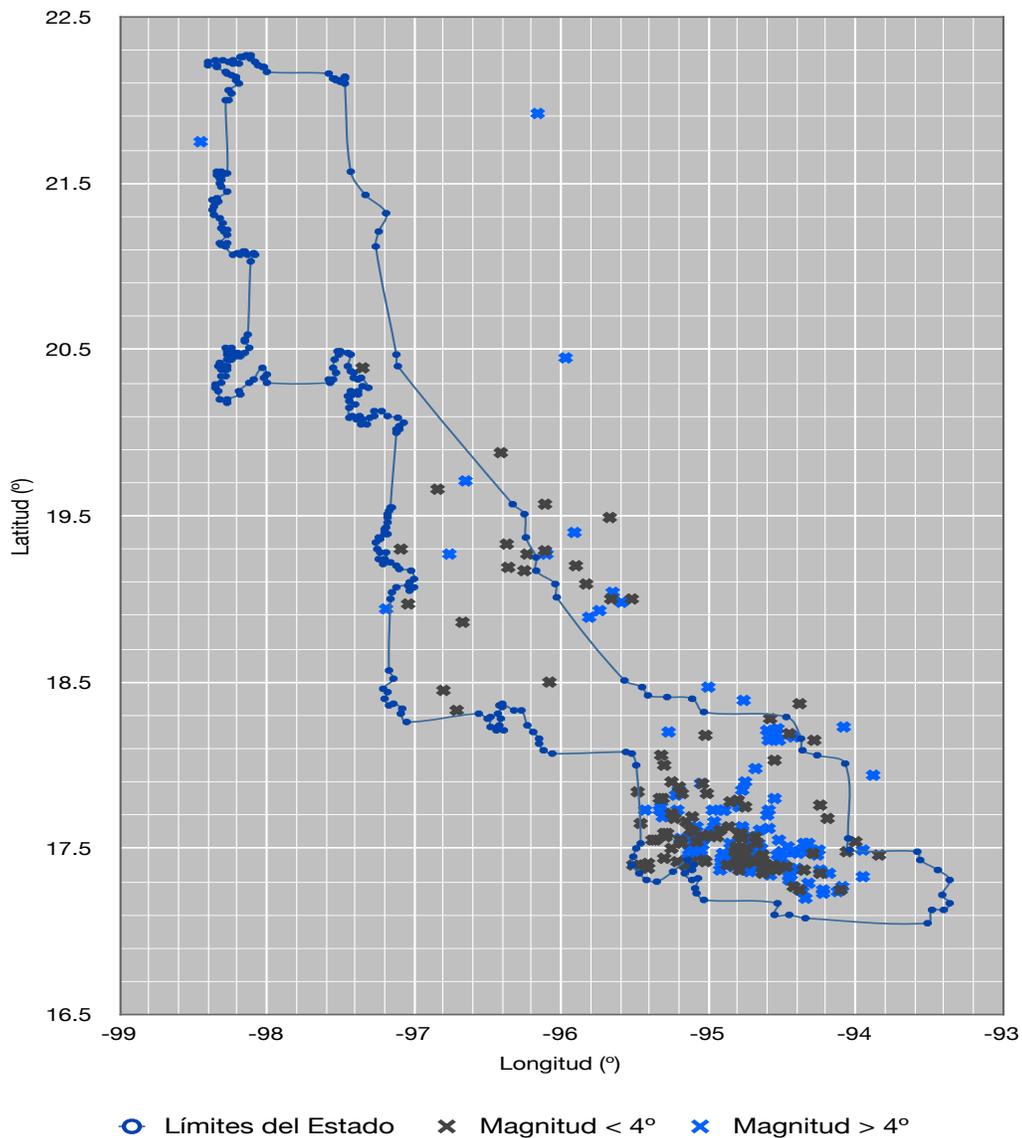


Figura 2.2: Carta Epicentral Moderna del estado de Veracruz. Se presenta la distribución espacial de epicentros de 232 eventos sísmicos ocurridos entre el 4 de Febrero de 2006 y el día 26 de Agosto de 2012.

2.3. Planteamiento del problema

Al observar las Figuras 2.1 y 2.2, es posible apreciar que la actividad sísmica característica del estado de Veracruz se clasifica en dos regiones muy bien diferenciadas: una en la región sur y otra en la región central. Presuntamente, la sismicidad en la zona sur es profunda, (con hipocentros localizados a varias decenas de kilómetros por debajo de la superficie), con magnitudes medianas (difícilmente mayores a 6 grados) asociadas a los eventos y con una frecuencia de acaecimiento moderada con respecto a la frecuencia de registro de sismos en la Costa del Pacífico Mexicano. Por otro lado, para regiones más céntricas del estado; ésta se caracteriza por ser poco profunda, poco frecuente y las magnitudes de sus sismos tienen valores escalares rara vez mayores a 4.

En este sentido, LAS preguntas son: ¿Cuáles son las causas cuyo efecto es esta actividad sísmica clasificada como de *moderada a baja*, en el estado de Veracruz? y ¿Cómo se explica que en una región limitada del espacio existan dos zonas bien diferenciadas que se caracterizan por tener sismicidades ajenas entre sí?.

2.4. Hipótesis

Dadas las intensidades y profundidades de los sismos registrados al sur del estado de Veracruz; la actividad sísmica está relacionada directamente con la subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Norteamérica. Asimismo, se especula que la sismicidad en la región central del estado; se debe a la presencia de pequeñas fallas geológicas cuyos mecanismos de ruptura son de tipo transcurrente sin poder asegurar si es de tipo lateral derecho o lateral izquierdo.

2.5. Objetivos

2.5.1. Objetivos generales

Este trabajo de investigación pretende determinar el tipo de mecanismos de ruptura para los sismos ocurridos en el estado de Veracruz, con el fin de encuadrarlos dentro del contexto tectónico regional.

Asimismo, se enfatiza enérgicamente que, para el autor; el objetivo principal de este trabajo es poder argumentar con base en el análisis de datos pertinentes, si es que existe algún tipo de riesgo significativo para la población al localizarse el Reactor Nuclear de *Laguna Verde* en la zona de estudio.

2.5.2. Objetivos particulares

Basándose en información proporcionada por el Servicio Sismológico Nacional, se obtendrá una Carta Epicentral más: *LA Carta Epicentral*, en la cual serán graficados datos tanto de la Carta Epicentral Antigua como de la Moderna, todos ellos con dos características en común: poseer una magnitud sísmica bien definida y una profundidad determinada. De este modo, serán presentados 1119 eventos que fueron registrados entre Enero de 1988 y Agosto de 2012.

Por otro lado, mediante la realización de tres diferentes perfiles; se determinará la distribución espacial de los hipocentros de estos eventos, es decir; se harán tres *cortes* en el plano X-Z para apreciar la distribución de focos con la profundidad. Esta información será útil para determinar si éstos siguen un patrón definido, y de este modo se demostrará que la subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa de Norteamérica es la respuesta a la interrogante en cuestión. Coincidiendo o discrepando con la hipótesis, será necesario determinar los mecanismos focales presentes en la zona mediante el análisis de polaridades y amplitudes de las señales registradas de los 24 sismos más energéticos registrados en el estado en los últimos seis años, particularmente entre el día 4 de Febrero de 2006 hasta el 26 de Agosto de 2012. El carácter *energético* estará dado por una magnitud mayor o igual a 4.5 grados.

De acuerdo a los mecanismos focales obtenidos, se encuadrarán los resultados en el contexto tectónico regional y se determinará si es que existe un riesgo importante para la población dada la superficialidad y la energía involucrada en la actividad sísmica que caracteriza el Suroeste del Golfo de México.

Capítulo 3

Metodología

En común acuerdo entre el autor y su tutor, se decidió que el presente trabajo de investigación fuese construido a partir de la realización de seis actividades. Se confió en que, con la satisfacción de éstas; sería viable alcanzar los objetivos arriba mencionados. Además de trabajar en el desarrollo de estas acciones, el autor consideró la actividad *cero*, a aquélla que se refiere a la revisión de bibliografía existente sobre la sismicidad histórica e instrumental del estado de Veracruz por concebirla como imprescindible [8], [6]. De este modo, se enumeran y describen dichas actividades a seguir:

3.1. Compilación de los registros de sismicidad con epicentros en el estado de Veracruz

Se consideró importante contar con la mayor cantidad de registros sísmicos en el estado de Veracruz para poder hacer una caracterización sísmica de la región mucho más objetiva. En este sentido, el catálogo de datos con el que trabajó el autor; cuenta con eventos ocurridos entre el 15 de Enero de 1974 y el 26 de Agosto de 2012. Dicho catálogo fue proporcionado en cinco diferentes listas de distribución de acuerdo a la región: Orizaba-Xalapa, Tuxtlas, Istmo, Tuxpan y Veracruz.

2384 sismos forman parte del listado total; muchos de los cuales; no cuentan ni con profundidad ni magnitud definidas dadas las limitantes de los instrumentos antiguos empleados en su determinación.

3.2. Creación de cartas epicentrales

Con la información proporcionada por la base de datos; se realizaron tres cartas epicentrales con el objetivo de conocer la distribución espacial de epicentros de eventos sísmicos detectados por la Red Sísmica Nacional en el estado de Veracruz. Cabe mencionar que esta Red cuenta actualmente con 36 estaciones a lo largo y ancho del territorio mexicano, la cual arroja información de alta calidad que permite desarrollar un análisis apropiado de los mecanismos focales para sismos ocurridos en los últimos seis años en este estado [15]. Para eventos más antiguos, la Red proporciona datos con errores asociados más significativos, pues ésta se componía por un número menor de estaciones sísmicas. En este sentido, es deber del autor pronunciar que pese a estas incertidumbres, se reportaron dichos eventos antiguos con el fin de caracterizar la sismicidad histórica en dicho estado.

De este modo, las cartas epicentrales presentadas llevan por nombre *Carta Epicentral Antigua*, *Carta Epicentral Moderna* y *LA Carta Epicentral*, donde sus respectivas descripciones se detallan en seguida:

3.2.1. Carta Epicentral Antigua

En esta carta, se observó la distribución epicentral de eventos registrados en Veracruz entre el 15 de Enero de 1974 y el 24 de Enero de 2006. Asimismo, se reporta que en ésta; se encuentran graficados 2151 sismos, donde 1265 corresponden a eventos que no tienen ni una magnitud ni una profundidad asociada (dada la fecha y la limitada resolución de los instrumentos) que se representan mediante cruces de color gris ténue, 536 eventos con magnitud $M \geq 4$ graficados en color azul, y 350 sismos con magnitud $M < 4$; en color gris oscuro.

3.2.2. Carta Epicentral Moderna

En la Carta Epicentral Moderna se graficaron los epicentros de sismos detectados entre el 4 de Febrero de 2006 y el 26 de Agosto de 2012 en territorio veracruzano. La Carta cuenta con un total de 233 eventos; 123 de los cuales; (azules) poseen una magnitud $M \geq 4$, mientras que los restantes 110 (grises); tienen asociada una magnitud de duración $M < 4$. En esta Carta, no hay sismo alguno que no tenga una magnitud sísmica bien definida o una profundidad bien calculada.

3.2.3. LA Carta Epicentral

En ella se presentan todos los eventos ocurridos en el estado de Veracruz entre el día 3 de Enero de 1988 y el 26 de Agosto de 2012. Todos estos sismos comparten la característica de contar con una magnitud de duración y una profundidad asociada.

El número total de eventos sísmicos corresponde a 1119, donde 659 poseen una magnitud $M \geq 4$ (azules), mientras que 460 son reportados con una magnitud $M < 4$ (en color gris). Para la elaboración de esta carta se prescindió de los eventos presentes en la Carta Epicentral Antigua que no contasen con dicha información, y se anexaron todos aquéllos que sí lo hacían tanto de la Carta Epicentral Antigua como de la Carta Epicentral Moderna. La elaboración de estas Cartas Epicentrales fue desarrollada con el propósito de realizar tres diferentes Perfiles a lo largo de territorio veracruzano, cuyas definiciones y descripciones, se describen en seguida.

3.3. Elaboración de Perfiles

Un Perfil es un *corte* del terreno en el plano X-Z o plano trazado a lo largo de un segmento de línea en superficie, en el que se muestra la distribución espacial de hipocentros en función de la profundidad. La realización de estos perfiles es importante para la determinación de algún patrón preestablecido en la localización de focos sísmicos, así como para la descripción del tipo de actividad sísmica que caracteriza cierta región tal como superficial, poco somera o profunda.

Para poder realizar los tres perfiles; fue necesario ubicar espacialmente la MAT (Middle American Trench) de manera precisa, pues los segmentos de línea antes citados; serían trazados perpendiculares a ella en cada uno de los tres puntos. En este sentido, fue necesario emplear como referencia la siguiente imagen proporcionada por Ego y Ansan (2002):

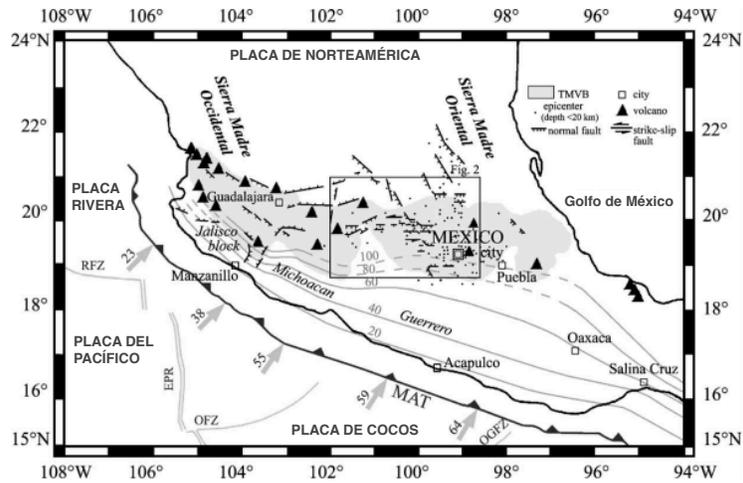


Figura 3.1: Ubicación espacial de la zona de Trincheras MAT. Imagen modificada de [11].

Una vez localizada la Trincheras, el autor se dispuso a emplear Google Earth, un programa que, empleando la métrica adecuada; permite localizar cualquier punto sobre la superficie terrestre aun sin conocer sus coordenadas exactas y determinar distancias entre dos lugares cualquiera con una incertidumbre asociada de ± 5 metros, si se reporta a ésta como la mitad de la mínima escala.

Así, se trazaron rectas cercanas a las zonas más densas de epicentros en LA Carta Epicentral que fuesen ortogonales a MAT en el mapa. Al hacerlo, cada punto fue proyectado sobre la línea más próxima de la siguiente manera: Después de graficar un evento sísmico cualquiera P en Google Earth mediante la introducción de sus coordenadas; se trazó un segmento de línea perpendicular (x) a la recta más cercana (y), de tal modo que ésta y el punto P estuviesen unidos mediante dicho segmento (x) y se midió la distancia comprendida entre ambos. Esta distancia sería el *cateto opuesto* del triángulo que se formaría más adelante. Ahora, anclado en el mismo punto P ; se trazó otra recta que llegase hasta la intersección entre la línea que representaba la zona de Trincheras (z) con la línea más cercana al evento (y). La distancia medida, sería el *cateto adyacente* del ya mencionado triángulo (w). De este modo, la proyección del punto P sobre la línea (y); resultaría ser la hipotenusa del triángulo ABC de la Figura 3.2. Este procedimiento fue realizado con cada uno de los 1119 eventos presentados en LA Carta Epicentral, donde cada uno de ellos fue proyectado sobre su segmento de línea en superficie (y) más cercano.

Al determinar la distribución espacial a los hipocentros a lo largo de estas rectas; fue necesario asociar profundidades a cada uno de los eventos para finalmente conocer la distribución espacial de todos los focos sísmicos en función de la profundidad. Esta información está incluida en la base de datos proporcionada por el Servicio Sismológico Nacional y por ello era importante hacer el estudio de todos los sismos graficados en LA Carta Epicentral pues, haciendo hincapié, muchos eventos de la Carta Epicentral Antigua carecen de una profundidad asociada.

En resumen, un perfil se construye sobre una línea cuyo origen se encuentra en la Trinchera que es perpendicular a ésta, en donde la componente horizontal de la gráfica es la distancia entre la Trinchera y la proyección de los epicentros sobre dicho segmento de recta y la componente vertical es la profundidad de los mismos.

Finalmente, cabe mencionar que, al ser tres el número de rectas trazadas en superficie; fueron tres los Perfiles obtenidos.

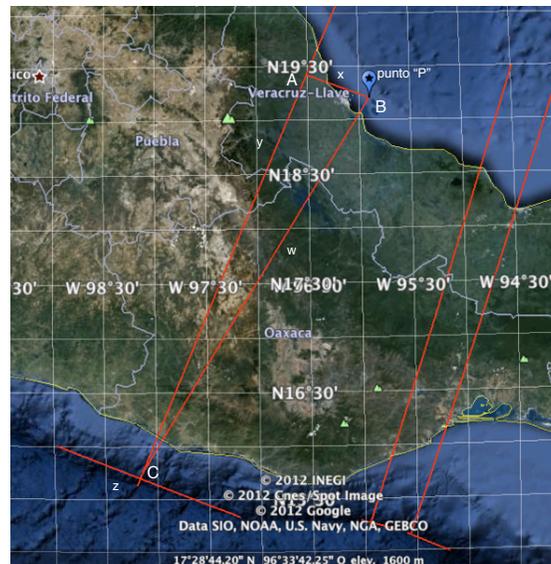


Figura 3.2: Segmentos de rectas trazadas en superficie para la realización de los tres Perfiles en territorio veracruzano. Ejemplo ilustrativo de la metodología seguida en su elaboración.

Por otro lado, se tiene presente que el título de la presente producción escrita es *Sismicidad y Mecanismos de Ruptura en el Suroeste del Golfo de México*, pero hasta el momento se ha hablado exclusivamente sobre la primera parte de la investigación, ¿Qué acontece con la segunda?

Sobre este segundo apartado; se realizaron de manera puntual, las siguientes actividades:

3.4. Creación de la base datos para análisis de mecanismos de ruptura

Esta base datos se compuso por todos aquellos eventos sísmicos registrados en el estado de Veracruz entre el 4 de Febrero de 2006 y el 26 de Agosto de 2012 (la misma ventana de tiempo de la Carta Moderna), que tuviesen una magnitud de duración $M \geq 4.5$. El número de eventos que satisficieron esta condición fue de 24, y sus respectivos detalles serán expuestos más adelante.

Cabe mencionar que se estableció esta característica, para garantizar una mayor objetividad en los resultados arrojados después del tratamiento analítico. Se recuerda que la magnitud de un sismo guarda una estrecha relación con la energía liberada por éste y si mayor es la energía involucrada, mayor será la facilidad de detección y análisis del evento.

Por otro lado, la temporalidad de los eventos fue considerada como la adecuada, dadas las mejores y cada vez más modernas condiciones de los instrumentos de medición.

3.5. Aplicación del software para la lectura de polaridades y amplitudes de fase de ondas S y P.

Para poder llevar a cabo el análisis de mecanismos focales, fue necesaria la implementación de un programa llamado *Seisan* (en su distribución para Windows Vista), gracias al cual fue posible leer digitalmente sismogramas de 24 eventos detectados en Veracruz por diversas estaciones de la Red Sísmica Nacional. La información detallada de estos sismos, será reportada en la sección 4.3 de la presente producción escrita.

El uso de dicho software permitió realizar dos diferentes tipos de análisis:

3.5.1. Análisis de *polaridades* de las señales

Se *leyeron* las señales detectadas de ondas primarias y secundarias. Asimismo, se indicó la polaridad de la señal que caracteriza el arribo de la onda P en cada uno de estos diagramas.

Se analizaron en total 2244 sismogramas, en algunos de los cuales se observó *ruido* que impidió una adecuada lectura de señales.

Tanto los tiempos de arribo como la polaridad de las señales fueron guardados en diversos archivos tipo texto que; posteriormente; serían de gran utilidad para desarrollar el análisis de los mecanismos de ruptura involucrados en la presencia de estos eventos. Dicho análisis sería desarrollado con la ayuda del programa *Focmec*, el cual determina estos mecanismos al introducir la polaridad de las señales estudiadas y las coordenadas geográficas de las estaciones sismológicas como parámetros de entrada.

3.5.2. Análisis de *amplitudes* de las señales

Este estudio consistió en determinar las amplitudes de las señales que representan los arribos de las ondas P y SH. Para ello, fue necesario hacer una rotación de ejes para pasar de un sistema de coordenadas arriba-abajo, norte-sur, este-oeste, a otro con componentes vertical, radial y transversal. Esta rotación de ejes encuentra su justificación en el siguiente argumento:

En las aplicaciones reales, comúnmente se define el eje Z como la dirección vertical y se orienta el plano x-z a lo largo del gran círculo que conecta una fuente sísmica como un receptor. Dentro de este plano se propagan las ondas planas que viajan en camino directo entre la fuente y el receptor. La componente polarizada en la vertical SV se desplaza en el eje x-z, mientras que la componente horizontalmente polarizada se desplaza en la dirección y, paralela a la superficie de la Tierra. Se puede demostrar que las ondas P y SV se acoplan cuando interactúan con fronteras horizontales, mientras que las ondas SH permanecen separadas.

Por otro lado, los sismómetros registran movimientos horizontales en las direcciones norte-sur y este-oeste, las cuales; raramente corresponden exactamente con las direcciones de polarización de SH y SV. De este modo, para hacerlas corresponder; frecuentemente los datos de las componentes horizontales de sismómetros están rotados.

La dirección que conecta la fuente y el receptor, correspondiente al desplazamiento de la onda SV, es conocida como la dirección *radial*, por lo que los sismogramas rotados a esta dirección se le llama componente radial. De manera similar, la dirección ortogonal que corresponde a los desplazamientos de la onda SH; se le llama dirección *transversal*, por lo que un sismograma rotado a esta dirección; se le conoce como componente transversal.

Bajo esta tesis, se indicó en los sismogramas rotados, la posición de crestas y valles tanto del primer arribo de la onda P en la componente vertical, como del arribo de la onda secundaria en las componentes vertical y transversal.

Al ejecutar esta acción, fue viable emplear el programa *Hash* que permite determinar los mecanismos de ruptura asociados a cada evento.

3.6. Correlación de mecanismos con la distribución de sismicidad

Una vez determinados dichos mecanismos de ruptura mediante el análisis descrito en la sección 1.1.2; se compararon los resultados obtenidos con ambos métodos y se entabló la relación existente entre éstos y la distribución de actividad sísmica en el estado, referida en la misma sección. Para ello, se ubicaron dichos mecanismos sobre mapas de acuerdo a su régimen tectónico en superficie y se optó por presentar la solución obtenida por HASH, dado que el método empleado por éste (el análisis de amplitudes) es mucho más restringido. El autor consideró que el perfil III es el más interesante en cuanto a la extracción de información, por lo que se proyectaron las pelotas de playa de once eventos sísmicos en donde dominaran los regímenes tectónicos tensionales. De esta manera, se determinó cuál es la distribución de focos sísmicos en relación a la posición del slab y se pudo determinar una dirección promedio del eje principal de tensión. Fue necesario emplear el software RAKE en su versión para Windows para poder visualizar dichas pelotas en sección vertical, así como utilizar un programa llamado StereoPro, para obtener el diagrama de roseta que nos proporcionaría la ya mencionada dirección promedio del eje de tensión.

Haciendo hincapié, esta correlación es importante para encuadrar los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación dentro del contexto sísmico regional.

Capítulo 4

Resultados

La realización de cada una de las actividades enlistadas en el capítulo anterior; permitió obtener los resultados que serán descritos a continuación y discutidos más adelante.

4.1. LA Carta Epicentral del estado de Veracruz

En la Figura 4.1, se muestra LA Carta Epicentral de Veracruz, cuyos 1119 eventos representan el objeto de estudio principal de la presente producción escrita. Se recuerda al lector que en esta Carta se encuentran graficados los epicentros de todos los sismos registrados en esta zona de estudio entre el 3 de Enero de 1988 y el día 26 de Agosto de 2012. Asimismo, se recuerda que los eventos con magnitud mayor o igual a 4 grados y los sismos con magnitud menor de 4, están representados mediante cruces azules y grises, respectivamente.

4.2. Perfiles en territorio veracruzano

En la Figura 4.2, se observan los tres segmentos de línea trazados sobre superficie que fueron utilizados para la creación de los ya mencionados Perfiles que muestran la distribución espacial de los hipocentros o focos sísmicos de los eventos cuyos epicentros fueron graficados anteriormente.

En este sentido, de acuerdo a las líneas trazadas y mostradas en la Figura 4.2; se presentan los tres perfiles, Perfil I, Perfil II y Perfil III; bajo los nombres de: Figura 4.3, Figura 4.4, y Figura 4.5. respectivamente.

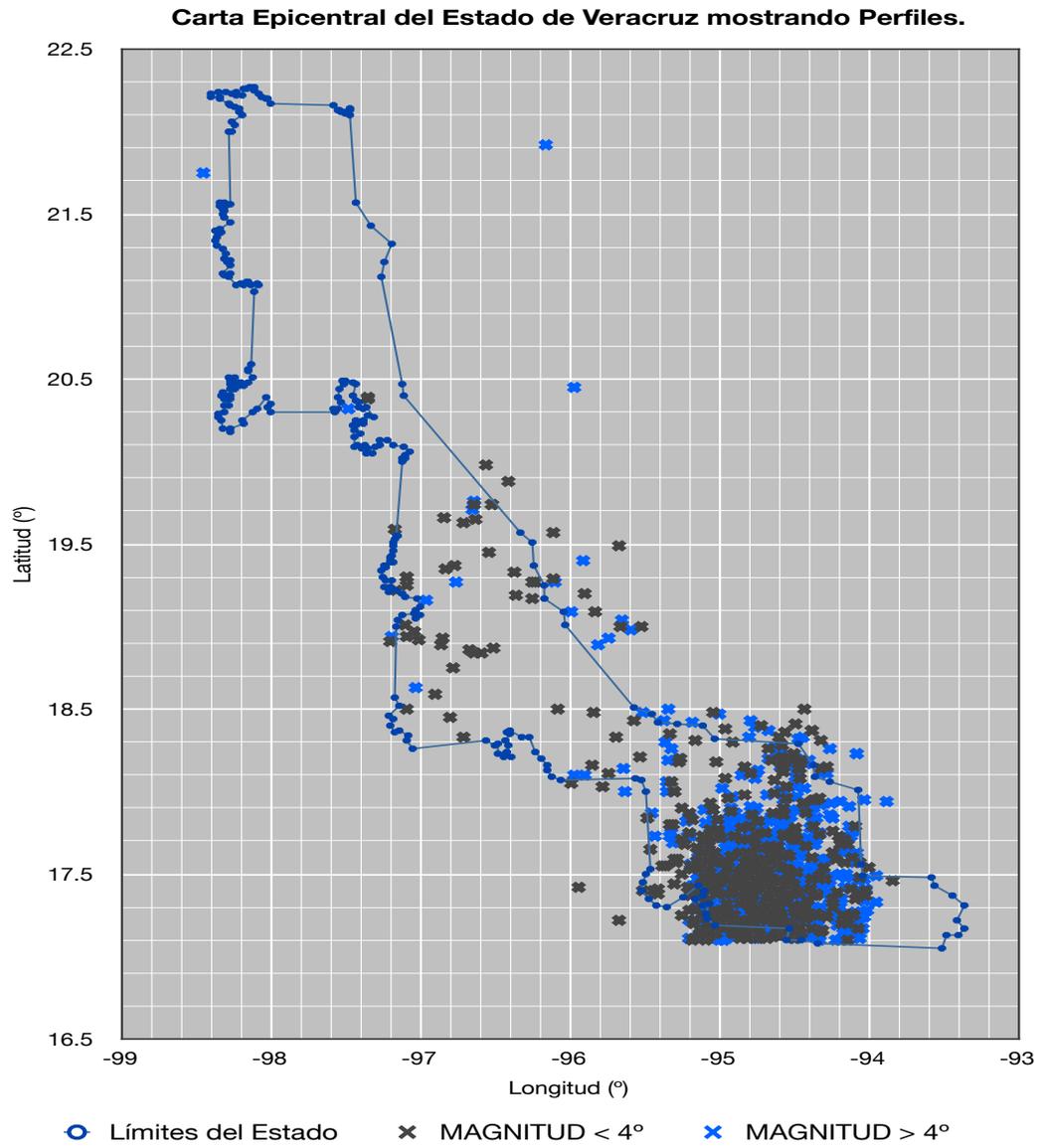


Figura 4.1: Carta Epicentral del estado de Veracruz. Se observa la distribución espacial de epicentros de 1118 eventos ocurridos entre el 3 de Enero de 1988 y el 17 de Mayo de 2012.

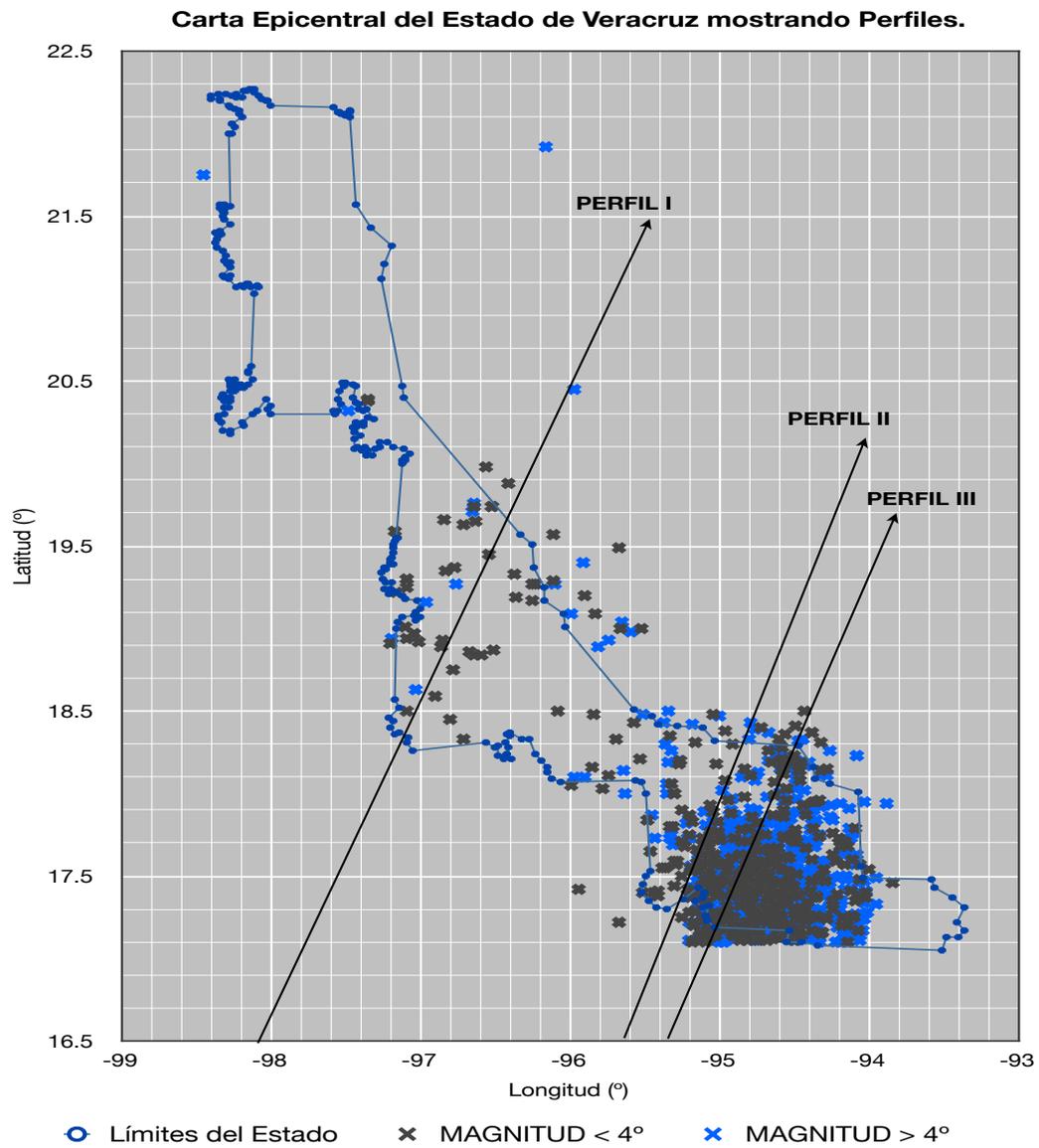


Figura 4.2: Se muestran las rectas trazadas sobre superficie para la elaboración de tres perfiles en el estado de Veracruz.

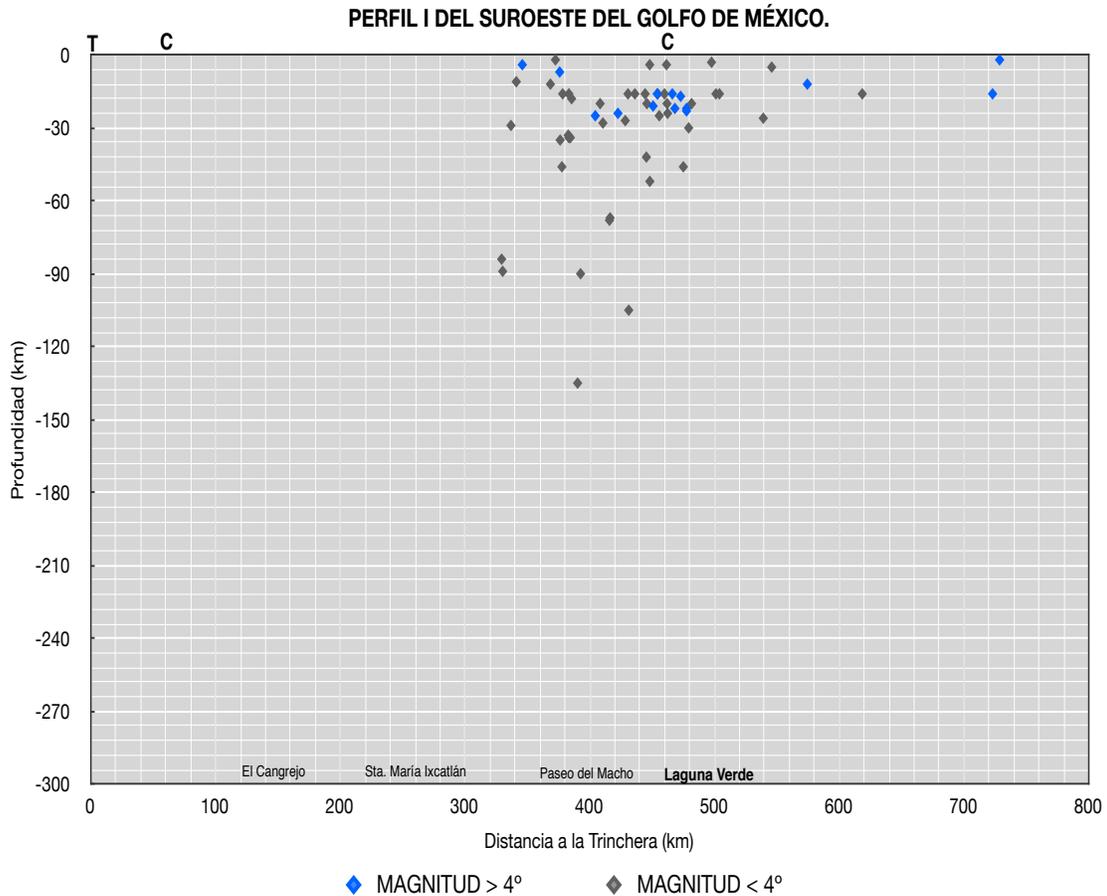


Figura 4.3: Se presenta el Perfil I en el que se muestra la distribución espacial de hipocentros en la región centro- norte de Veracruz como función de la profundidad. Este perfil tiene como coordenadas iniciales: 15° 42'21" de latitud norte, 98° 09'04" longitud oeste, y como coordenadas finales: 23° 28'51" de latitud norte, 94° 36'12" longitud oeste.

La letra T se refiere a Trinchera, mientras que las letras C hacen referencia a las costas (Pacífico y Golfo de México). Asimismo, en la parte inferior del perfil se reportan las ciudades por las que *transita* el segmento de recta en superficie.

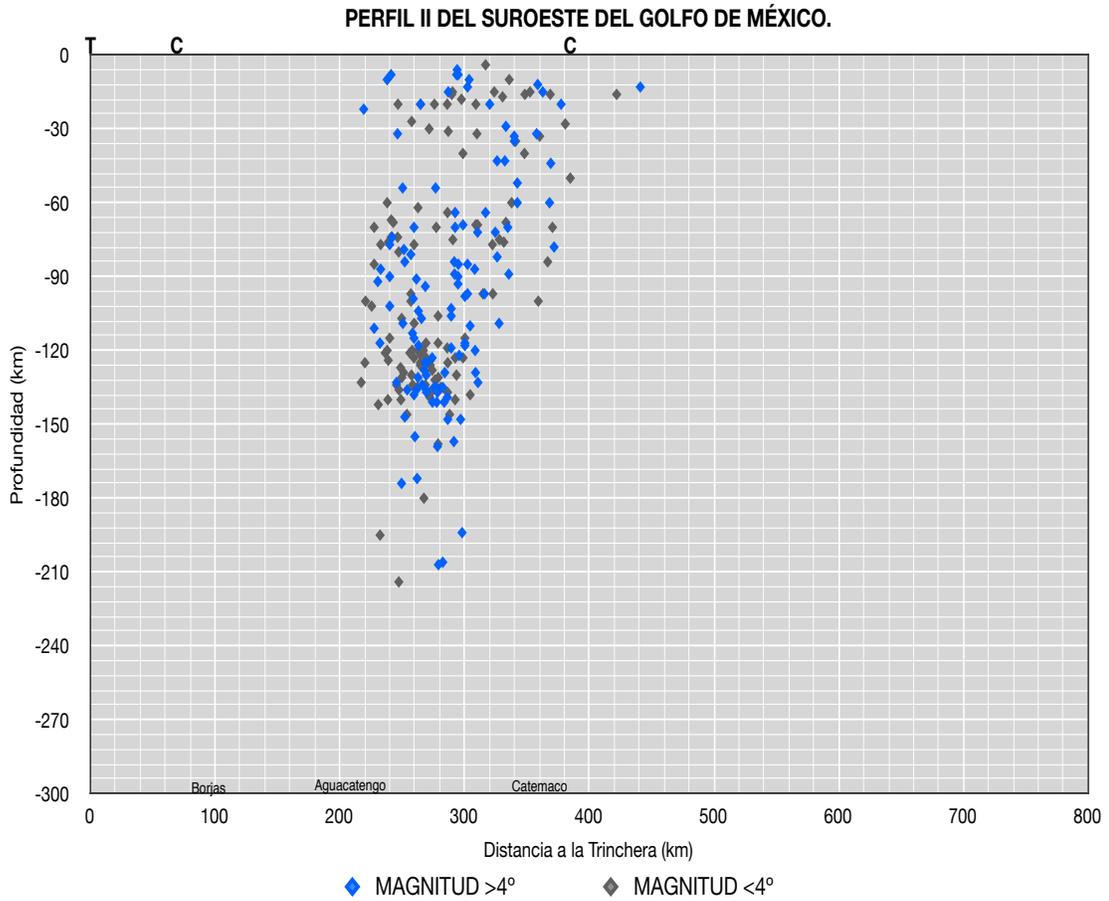


Figura 4.4: Se muestra el Perfil II en el que se observa la distribución espacial de focos sísmicos en el sur del estado. Este perfil tiene coordenadas iniciales: 15° 17'28" de latitud norte, 95° 57'23" longitud oeste, y coordenadas finales: 19° 29'39" de latitud norte, 94° 29'10" longitud oeste.

Las letras T y C hacen referencia a la Trinchera y a las Costas, respectivamente, mientras que los pequeños letreros en la parte inferior de la Figura, hacen alusión a las ciudades por las que *pasa* la recta en superficie.

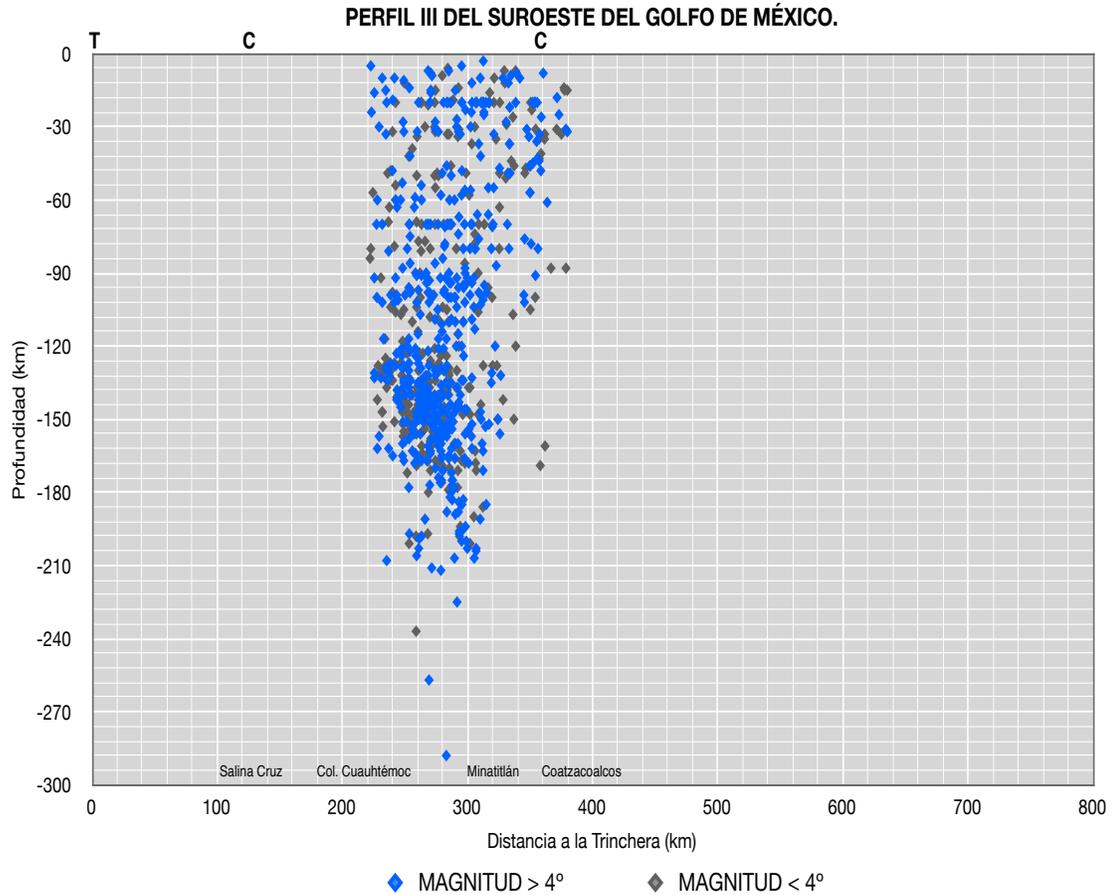


Figura 4.5: Se muestra el Perfil III donde se presenta la distribución espacial de hipocentros en función de la profundidad, también en la zona sur del estado de Veracruz. Dicho perfil, tiene coordenadas iniciales 15° 09'39" de latitud norte, 95° 33'22" longitud oeste, y coordenadas finales: 19° 18'08" de latitud norte, 94° 03'48" longitud oeste.

La letra T representa la Trinchera, mientras que las letras C; las Costas del Pacífico y del Golfo de México. Por último, se muestran en la parte inferior, ciudades veracruzanas ubicadas a lo largo del segmento de recta trazado en superficie.

4.3. La base de datos

Como se mencionó anteriormente, fue necesario elaborar una base de datos que contuviese los registros sísmicos que satisficiesen las condición de poseer una magnitud mayor o igual a 4.5°. Este listado de eventos, es presentado al lector en seguida:

Fecha	Hora	Latitud	Longitud	Prof. (km)	Magnitud	Ubicación
27/04/2006	12:30	17.48	-94.43	175	4.5	58 km. al SUR de MINATITLÁN, VER.
08/05/2006	03:29	17.47	-94.39	178	4.6	58 km. al SUROESTE de LAS CHOAPAS, VER.
16/09/2006	20:16	17.61	-94.77	154	4.5	36 km. al SURESTE de SAYULA DE ALEMÁN, VER.
29/12/2006	19:58	18.17	-94.42	35	4.5	2 km. al NOROESTE de ALLENDE, VER.
01/01/2007	16:05	17.51	-94.46	175	4.5	53 km. al SUR de MINATITLÁN, VER.
23/05/2007	14:09	21.92	-96.16	16	5.2	167 km. al NORESTE de TUXPAM DE RDZ. CANO, VER.
28/07/2007	14:28	17.52	-95.04	128	4.5	41 km. al SUR de SAYULA DE ALEMÁN, VER.
15/09/2007	05:30	17.46	-94.71	153	5.0	54 km. al SURESTE de SAYULA DE ALEMÁN, VER.
01/10/2007	09:41	17:24	-94.36	149	4.7	80 km. al SUROESTE de LAS CHOAPAS, VER.
13/01/2008	19:03	17.48	-94.42	183	4.6	59 km. al SUR de MINATITLÁN, VER.
20/01/2008	19:53	17.52	-94.7	145	4.5	48 km. al SURESTE de SAYULA DE ALEMÁN, VER.
24/01/2008	21:16	17.85	-94.77	160	4.5	14 km. al SUROESTE de JALTIPAN DE MORELOS, VER.
24/06/2009	17:36	17.27	-94.09	188	4.8	71 km. al SUR de LAS CHOAPAS, VER.
08/09/2009	00:14	17.68	-95.77	102	5.1	46 km. al SUROESTE de ISLA, VER.
29/10/2009	04:52	18.89	-95.81	13	5.5	14 km. al NOROESTE de ALVARADO, VER.
19/08/2010	03:49	17.63	-94.77	154	4.7	34 km. al SURESTE de SAYULA DE ALEMÁN, VER.
25/02/2011	07:07	17.73	-95.21	135	6.0	32 km. al SUROESTE de SAYULA DE ALEMÁN, VER.
07/04/2011	08:11	17.2	-94.34	167	6.7	83 km. al SUROESTE de LAS CHOPAS, VER.
03/06/2011	09:21	17.69	-95.31	135	4.9	35 km. al SURESTE DE J RDZ. CLARA, VER.
23/09/2011	12:14	17.3	-95.67	101	4.9	81 km. al SUROESTE de J RDZ. CLARA, VER.
06/12/2011	23:13	17.49	-94.25	194	5.1	50 km. al SUROESTE de LAS CHOAPAS, VER.
18/01/2012	06:39	17.73	-95.33	207	4.5	30 km. al SURESTE de J RDZ. CLARA, VER.
18/01/2012	13:55	18.15	-94.52	57	4.9	9 km. al OESTE de COATZACOALCOS, VER.
14/02/2012	00:52	19.27	-96.1	16	4.5	9 km. al NORESTE de VERACRUZ, VER.

Figura 4.6: Tabla 1: Listado de sismos estudiados en análisis de mecanismos focales.

Una vez realizada esta base de datos, se dispuso a determinar cuáles son los mecanismos de ruptura involucrados en cada uno de los sismos que la conforman.

4.4. Mecanismos focales en el estado de Veracruz

A continuación, se presentarán tres ejemplos de las pelotas de playa obtenidas. El autor considera monótono presentar las 24 figuras, pero señala que todas las figuras pueden ser observadas en su cuenta de Dropbox. Sólo es necesario buscar a José Bayona en [3]. Por notación, los triángulos rojos representan dilataciones y los círculos azules simbolizan compresiones. En estas representaciones estereográficas, se muestran los planos I y II calculados por Focmec en azul, mientras que los planos I y II determinados por Hash; en verde. Los valores de strike, dip y rake característicos de cada plano, serán presentados más adelante en tablas.

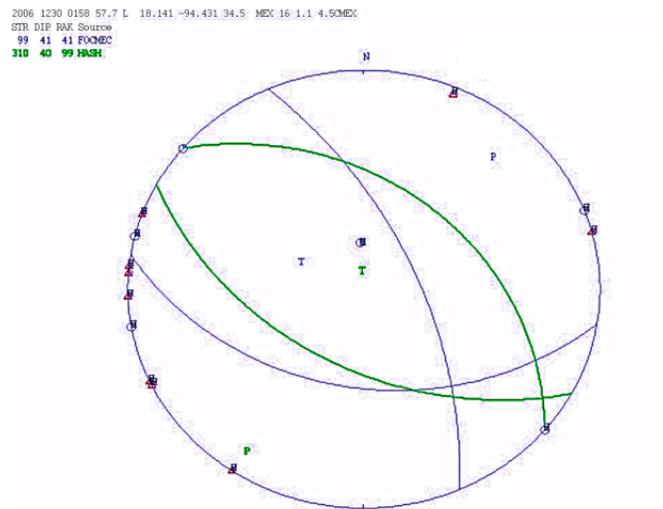


Figura 4.7: Se reporta un mecanismo focal de tipo INVERSO para el sismo del 29 de Diciembre de 2006. En la Figura, la letra T representa el cuadrante de tensiones, mientras que la letra P representa los cuadrantes de presiones. Por otro lado, las letras H expresan razones de amplitudes SH/P.

2007 1 1 2205 18.0 L 17.466 -94.482174.9 MEX 18 0.9 4.6CMEX
STR DIP RAK Source
312 71 -68 FOCMEC
129 44 -91 HASH

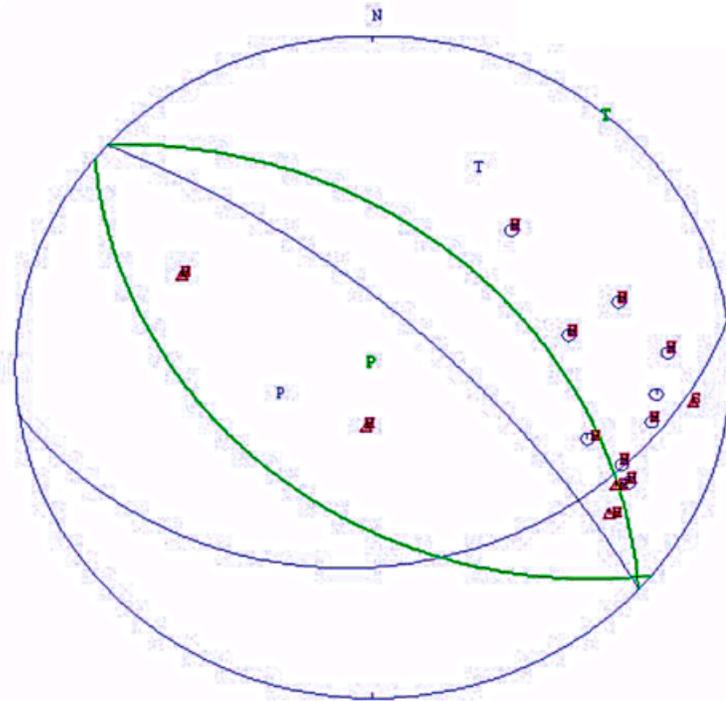


Figura 4.8: Se observa un mecanismo focal NORMAL para el sismo del día 1 de Enero de 2007. La letra T representa el cuadrante de tensiones, mientras que la letra P representa los cuadrantes de presiones. Por otro lado, las letras H expresan cocientes de amplitudes SH/P.

2007 523 1909 15.7 L 21.968 -96.194 37.1, MEX 27 3.7 5.4CMEX
SIR DIP RAK Source
271 47 -14 FOCMEC
10 SS 179 HASH

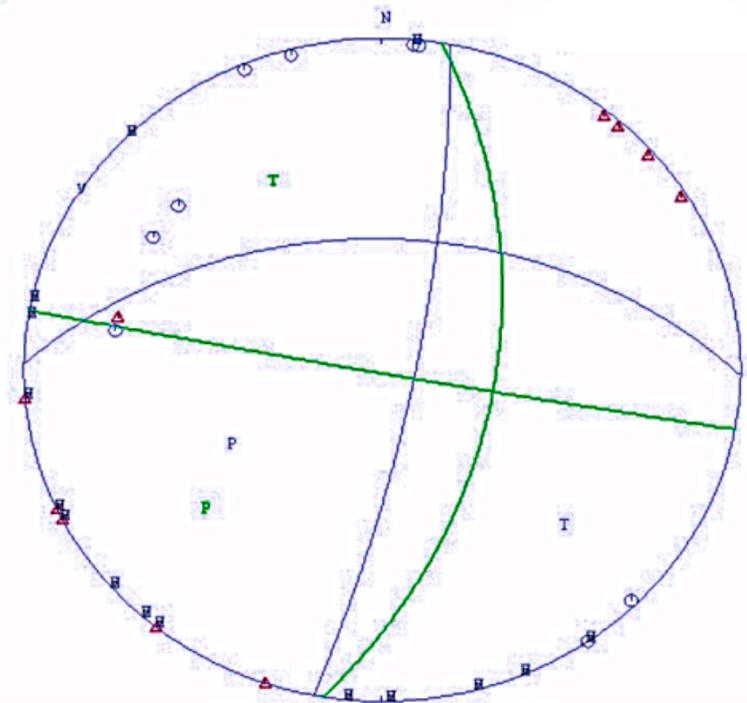


Figura 4.9: Se muestra un mecanismo focal aparentemente de tipo LATERAL o STRIKE-SLIP para el sismo del día 23 de Mayo de 2007. La letra T representa el cuadrante de tensiones, mientras que la letra P representa los cuadrantes de presiones. Por otro lado, las letras H expresan razones de amplitudes SH/P.

De este modo, al determinar el rumbo o strike en inglés (el ángulo con respecto al norte geográfico), el echado o slip en inglés (el ángulo con respecto a la horizontal) y el buzamiento o rake (la dirección en la que un bloque se desplaza durante la ruptura medida sobre el plano de falla y relativa al strike) de cada uno de los planos I, así como de sus correspondientes planos ortogonales II; se posible determinar el azimuth y echado o *plunge* de los ejes de presión y tensión asociados a las principales direcciones de esfuerzos. Como se prometió, esta información es presentada en las siguientes tablas:

Fecha	PLANO I usando:			PLANO II usando:			EJE DE PRESIÓN usando los ángulos obtenidos con:			EJE DE TENSIÓN usando los ángulos obtenidos con:			Fallo- miento								
	HASH			FOCMEC			HASH			FOCMEC											
	Pum do(°)	Ech do(°)	Buz men to(°)	Pum do(°)	Ech do(°)	Buz men to(°)	Azimut (°)	Plunge (°)	Azimut (°)	Plunge (°)	Azimut (°)	Plunge (°)									
	Rum bo(°)	Ech ado(°)	Buz am en to(°)	Rum bo(°)	Ech ado(°)	Buz am en to(°)															
27/04/06	205	57	-22	216	73	-23	307	72	-145	314	88	-160	170.61	37.38	174.37	29.43	73.35	9.38	263.37	1.78	Lateral Normal
08/05/06	128	73	-175	31	54	-19	37	85	-17	132	75	-143	351.05	15.40	357.85	37.00	83.42	8.50	257.01	13.26	Lateral Normal
16/06/06	308	86	-143	202	82	-48	215	53	-5	200	49	-142	178.11	28.28	163.41	52.74	75.53	22.03	263.49	7.59	Normal Lateral
29/12/06	310	40	99	99	41	41	118	51	83	336	85	123	213.52	5.32	42.25	13.26	346.04	82.14	291.04	55.93	Inverso
01/01/07	129	44	-91	312	71	-68	310	46	-99	81	29	-137	254.38	88.78	232.20	58.22	39.71	1.00	25.28	22.94	Normal Lateral
23/05/07	10	55	179	271	47	-14	101	89	35	11	80	-158	229.57	23.30	240.73	37.40	331.02	24.56	133.73	20.92	Lateral
28/07/07	212	28	-85	18	81	-77	26	62	-93	173	32	-112	290.00	72.75	317.22	70.88	118.30	17.07	98.52	15.06	Normal
15/09/07	178	25	-99	338	50	-89	8	65	-86	156	40	-91	286.32	68.38	256.05	84.94	94.77	20.22	67.29	5.00	Normal
01/10/07	199	46	-81	328	60	-89	6	45	-99	146	30	-92	187.01	83.51	240.73	74.98	282.65	0.64	57.27	14.99	Normal
13/01/08	167	31	-95	329	60	-89	333	59	-87	146	30	-92	271.42	75.88	240.73	74.98	80.64	14.08	57.27	14.99	Normal
20/01/08	335	6	135	67	90	45	110	86	86	337	45	-160	203.80	40.61	192.26	30.00	15.25	49.06	301.74	30.00	Lateral Inverso
24/01/08	210	19	-97	210	30	-89	37	71	-88	29	60	-91	311.25	63.78	297.27	74.98	126.51	26.11	119.27	15.00	Normal

Figura 4.10: Tabla 2a: Se muestran los ángulos strike, dip y rake de los planos auxiliares de los planos I y II determinados por HASH y FOCMEC. Asimismo, se muestran los ángulos de azimuth y plunge de los ejes de tensión y presión calculados con FOCMEC y HASH, así como los mecanismos focales involucrados en cada uno de los eventos enlistados.

Fecha	PLANO I usando:			PLANO II usando:			EJE DE PRESIÓN usando los ángulos obtenidos con:			EJE DE TENSIÓN usando los ángulos obtenidos con:			Falla- miento								
	HASH			FOCMEC			HASH			FOCMEC											
	Buza do (°)	Echaz do (°)	Rum bo (°)	Buza men to (°)	Echaz do (°)	Rum bo (°)	Buza men to (°)	Echaz do (°)	Rum bo (°)	Azimuth (°)	Plunge (°)	Azimuth (°)		Plunge (°)							
24/06/09	350	64	-137	217	28	-42	238	52	-34	346	72	-112	209.35	48.02	226.27	57.83	111.41	7.09	91.97	23.71	Normal Lateral
06/09/09	271	49	-130	142	62	-66	143	55	-54	279	36	-127	112.42	60.78	93.85	64.47	208.1	3.16	214.8	13.79	Normal Lateral
26/10/09	377	55	109	116	54	59	126	39	65	342	46	125	53.55	8.17	227.42	4.29	296.6	72.41	326.7	64.96	Inverso Lateral
19/08/10	115	87	145	224	62	11	207	55	4	129	80	152	166.47	21.59	179.27	12.29	65.22	26.23	82.95	26.81	Lateral Inverso
25/02/11	165	86	160	243	45	0	257	70	5	153	90	135	212.51	10.33	207.74	30.00	119.2	17.61	98.26	30.00	Lateral Inverso
07/04/11	157	30	-81	328	60	-89	327	60	-95	146	30	-92	223.24	74.06	240.73	74.98	60.42	15.26	57.27	14.99	Normal
03/06/11	339	54	-110	196	53	-64	191	41	-65	337	44	-120	195.89	72.40	165.55	68.93	83.10	7.00	267.9	4.70	Normal
23/09/11	145	44	-143	30	74	-36	27	65	-52	131	56	-161	342.15	53.54	346.35	36.47	90.31	12.30	84.24	11.81	Normal Lateral
06/12/11	125	89	135	209	25	0	216	45	1.4	119	90	115	180.06	29.18	186.09	39.86	70.60	30.81	51.91	39.86	Lateral Inverso
18/01/12	30	49	107	256	41	-40	235	43	-71	18	65	-124	233.53	76.97	243.42	56.29	131.9	2.66	132.1	13.62	Normal Lateral
18/01/12	198	88	-145	110	45	0	107	55	-2.4	20	90	135	68.09	25.47	74.74	30.00	326.8	22.37	325.3	30.00	Lateral Inverso
14/02/12	22	87	156	90	61	-27	113	66	3.3	194	67	-148	70.15	14.49	53.70	38.58	335.1	18.91	320.9	3.56	Lateral

Figura 4.11: Tabla 2b: Se muestran los ángulos strike, dip y rake de los planos auxiliares de los planos I y II calculado con HASH y FOCMEC. Asimismo, se muestran los ángulos de azimuth y plunge de los ejes de tensión y presión determinados por FOCMEC y HASH, así como los mecanismos de ruptura involucrados en cada uno de los eventos enlistados.

Probablemente, la última columna de la Tabla 2 ha llamado la atención del lector en el sentido de cuestionarse ¿Por qué se incluyen mecanismos focales en ella si ya se habían determinado previamente? Pues, una vez obtenidos los valores del plunge de los ejes principales de tensión y presión; se pudieron determinar estos mecanismos focales ahora de manera analítica siguiendo el modelo de EPRI (1994) y Triep y Sykes (1996, 1997) quienes, empleando diagramas triangulares y geometría analítica; determinaron regímenes tectónicos con aproximaciones muy sofisticadas.

Aunque éste no es el modelo más reciente, es el que, a gusto del autor; presenta más detalle sobre dichos regímenes, como puede apreciar el lector:

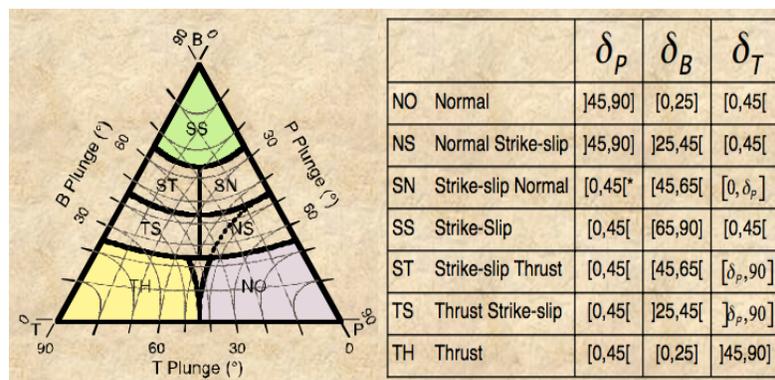


Figura 4.12: Representación triangular de regímenes tectónicos propuesta por EPRI, Triep y Sykes [10].

En este sentido, si además de contar con las famosas pelotas de playa; ya se cuenta con un tratamiento matemático que permite determinar cuáles son los mecanismos focales asociados a cada uno de los eventos, y se observa que ambos métodos son compatibles; éstos pueden ser proyectados sobre un mapa y un perfil para conocer cómo está dada su correspondiente distribución en el espacio. Dichas distribuciones serán clasificadas de acuerdo a los tres tipos de regímenes tectónicos (de tipo compresional, tensional y de corrimiento de rumbo) y mostrarán los mecanismos focales calculados con Hash, dada la analiticidad del método:

4.5. Distribución espacial de mecanismos focales en superficie

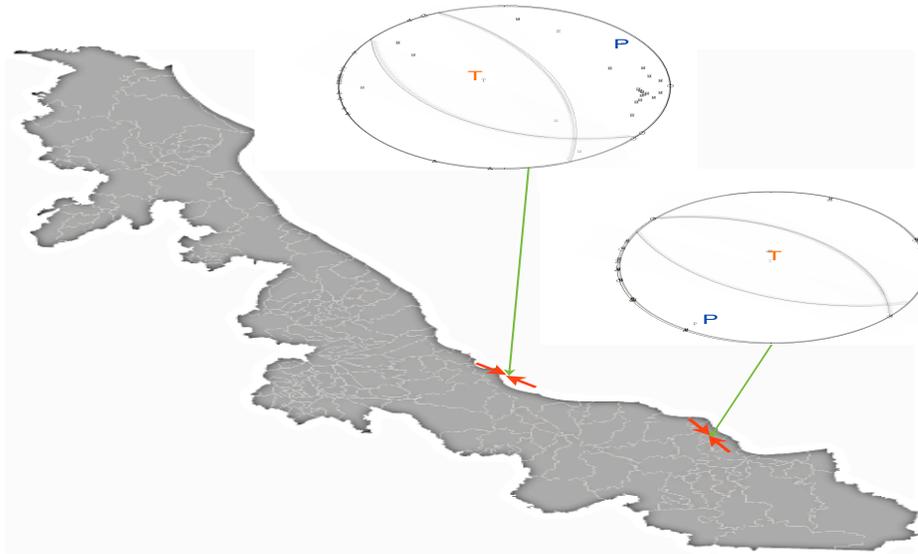


Figura 4.13: Se muestra la distribución de mecanismos focales en el estado de Veracruz donde domina el régimen tectónico COMPRESIONAL, es decir; la distribución de mecanismos focales inversos en Veracruz, producto de esfuerzos de tipo compresional. Asimismo, se presentan las direcciones de los ejes principales de presión que, por tradición; se representa mediante dos flechas convergiendo a un mismo punto.



Figura 4.14: Se presenta la distribución espacial en superficie de los mecanismos focales en el estado de Veracruz donde dominan los regímenes tectónicos de tipo TENSIONAL, es decir; la distribución en el espacio de mecanismos focales normales, producto de esfuerzos tensionales. Asociados a ellos, se presentan las direcciones principales de los ejes de tensión representados mediante flechas que se alejan entre sí.

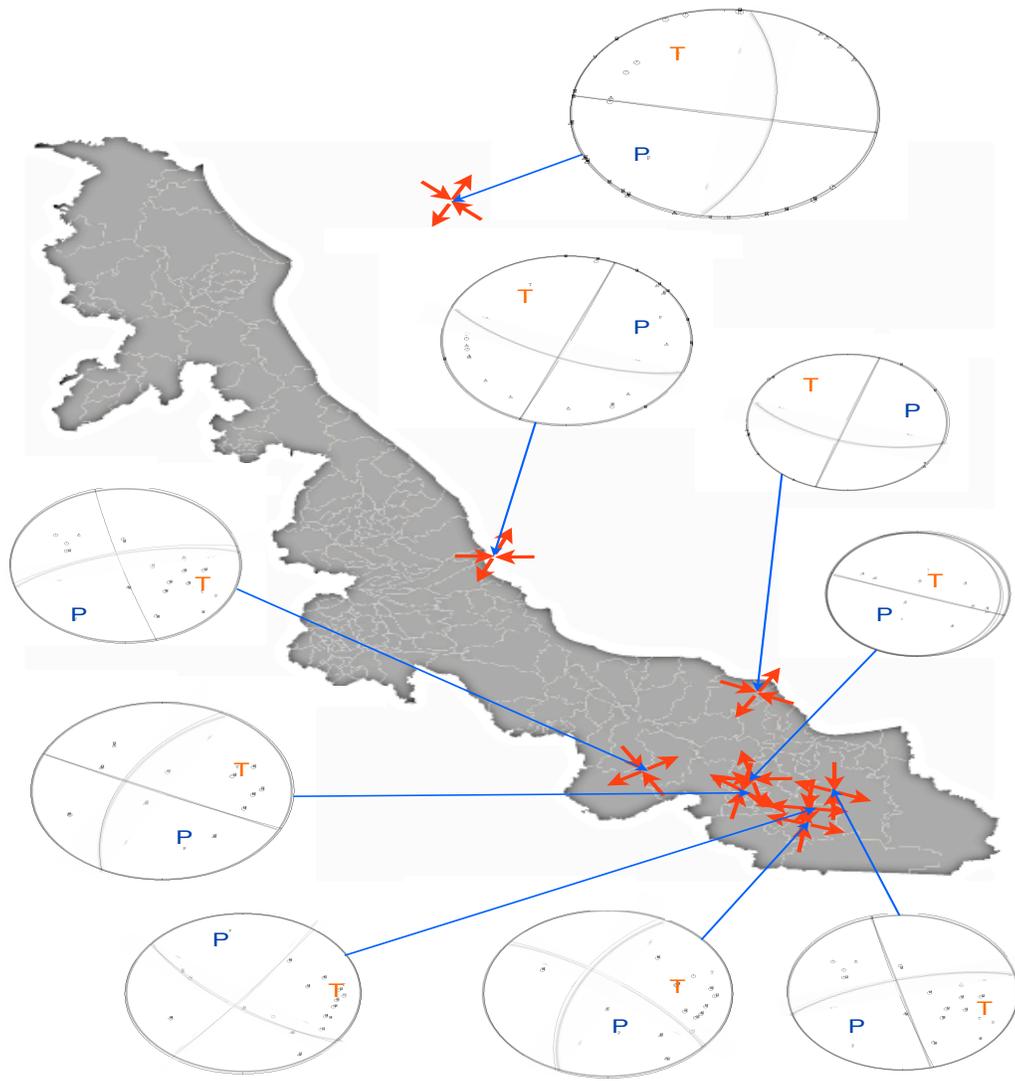


Figura 4.15: Se observan los mecanismos focales de Veracruz en donde dominan los regímenes tectónicos de CORRIMIENTO DE RUMBO, así como las correspondientes direcciones de sus ejes de presión y tensión. Los planos nodales se encuentran a 45° grados de las direcciones de dichos ejes.

4.6. Distribución espacial de mecanismos focales normales en perfil III

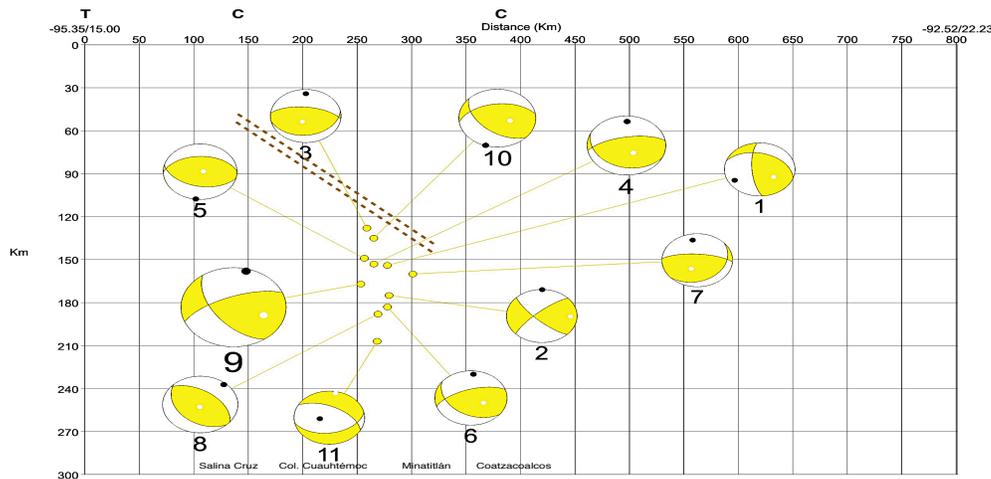


Figura 4.16: Distribución de mecanismos de ruptura de tipo normal en el Perfil III del estado de Veracruz. Aquí, dominan los regímenes tectónicos de tipo TENSIONAL. En la Figura, las letras T y C representan la trinchera y las costas del Pacífico y Golfo de México, respectivamente. Asimismo, en café se representa la orientación del slab reportado por Melgar y Pérez-Campos (2010).

Podría resultar confuso para el lector el hecho de que se reporte la distribución en perfil de once mecanismos focales de tipo normal, cuando previamente (en la Figura 4.14) fueron reportados trece en superficie. La razón que de esto, es que dos de estos trece eventos, no fueron registrados estrictamente en territorio veracruzano, sino en la frontera de Veracruz con Oaxaca.

Por otro lado, la intención de mostrar la distribución espacial de mecanismos focales normales en perfil, es determinar la zona en la que está localizada la actividad sísmica del sur de Veracruz en relación con la posición y orientación del slab en esa región. De acuerdo a esta Figura, sismicidad importante que caracteriza la región sur del estado de Veracruz, se localiza *por debajo* de la posición del slab.

Por ser de gran interés, el autor se permitirá discutir éste y otros resultados a continuación.

Capítulo 5

Discusiones y conclusiones

5.1. La actividad sísmica en el estado de Veracruz

Al observar LA Carta Epicentral del estado de Veracruz y los tres perfiles, (Figura 4.1 y Figuras 4.3, 4.4 y 4.5 respectivamente); es natural interpretar que la distribución de epicentros de los eventos sísmicos en estudio, guarda una estrecha relación con la distribución de hipocentros de los mismos pues, mientras que al sur del estado la densidad de epicentros es muy alta y los hipocentros son muy profundos (Perfil III); en la región centro-norte, la densidad de epicentros aunque alta, es menor en comparación con la densidad hacia el sur antes mencionada. Asimismo, los focos sísmicos son más someros en el Perfil II que en el Perfil III.

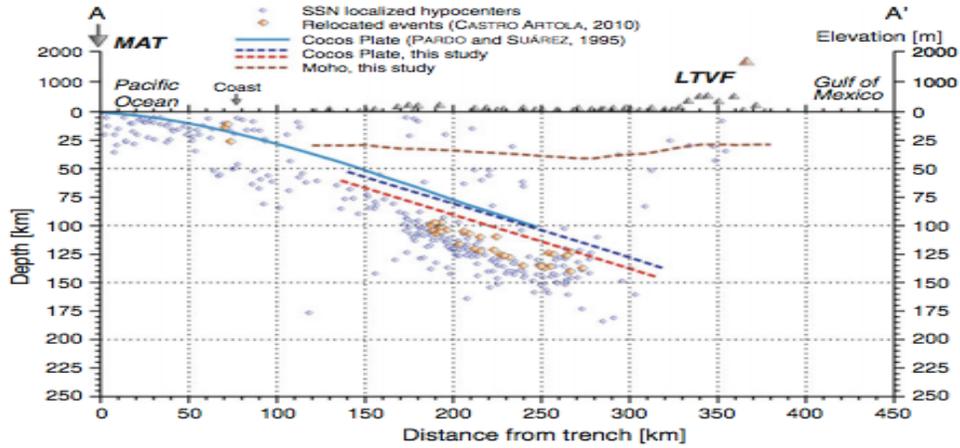
Finalmente, la sismicidad en la región noreste del estado es muy poco frecuente y muy superficial, de acuerdo al Perfil I. Suárez (2010), se ha formulado la hipótesis de que este fenómeno encuentra su origen en una deformación tectónica de la región norte del Istmo de Tehuantepec que se refleja en sismicidad en el suroeste del Golfo de México. Sobre dicha hipótesis, se hablará más adelante [19].

Por otro lado, la Figura 4.15 sugiere que, la presencia de eventos sísmicos cuyo tipo de fallamiento es de corrimiento de rumbo; podría explicarse suponiendo una posible interacción de pequeñas fallas geológicas que se desplazan de manera lateral.

Asimismo, la sismicidad al sur de Veracruz puede ser explicada con la subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa de Norteamérica pues, dada su geometría; está siendo subducida justo por debajo de la región sur del estado y es la responsable de la presencia de sismos moderadamente frecuentes, profundos y con magnitudes sísmicas importantes.

Para concluir esto, se comparó el Perfil III con un modelo propuesto por Melgar y Pérez-Campos (2010) quienes, usando datos telesísmicos; modelaron la geometría de la subducida placa de Cocos por debajo del Istmo de Tehuantepec. La Figura 5.1 habla por sí misma:

a)



b)

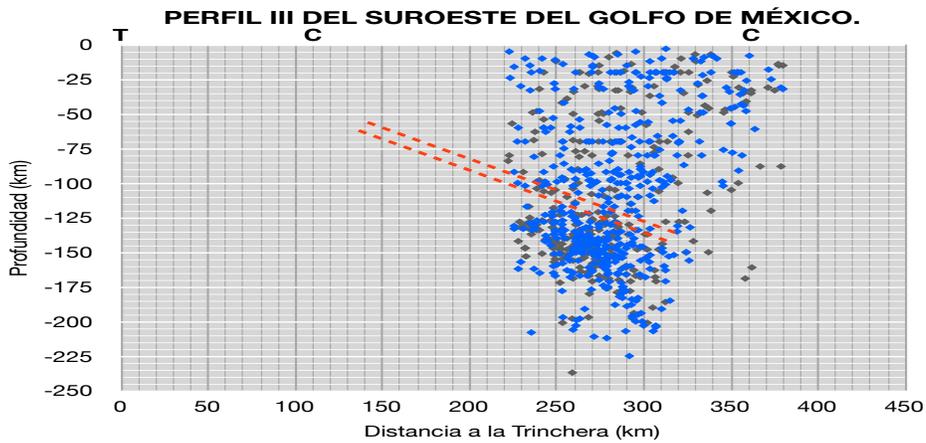


Figura 5.1: Se presenta una comparación de a) El perfil AA* VEOX propuesto por Melgar y Pérez-Campos (2010) [14] y b) El perfil III obtenido por el autor empleando la base de datos del SSN. En ambos se muestra la orientación del slab y la distribución de focos sísmicos en el sur del estado de Veracruz. Ambos perfiles son *comparables*, pues las coordenadas de a) son 15° 16'12" N, 95° 49'48" longitud Oeste iniciales; 19° 00'00" N, 94° 03'00" longitud Oeste finales; mientras que las coordenadas de b) son 15° 09'39" N, 95° 33'22" longitud Oeste iniciales; 19° 18'08" N, 94° 03'48" longitud Oeste finales.

Las predicciones de dicho modelo son consistentes con los resultados obtenidos, pues el paso de la Placa de Cocos está ubicado ligeramente más arriba que la distribución densa de hipocentros reportados en este estudio, resultado también documentado por Pardo y Suárez (1995). En este sentido es innegable que es la dinámica de la Placa de Cocos la causa de efectos como los eventos sísmicos profundos y moderadamente frecuentes que caracterizan la región sur del estado de Veracruz.

Es interesante observar que, de acuerdo a esta comparación; la placa *separa* la región densamente poblada por focos sísmicos de la región de hipocentros menos densa ubicada a profundidades más someras. Es un hecho que a esas profundidades, dadas las condiciones de presión y temperatura; a esas profundidades, la placa de Cocos se *difumina* con el manto, por lo que cualquier resultado está sujeto a errores. En este sentido, el autor invita al lector a cuestionarse sobre la naturaleza de este resultado.

Por otro lado, era predecible que los mecanismos focales en donde dominaran los regímenes tectónicos tensionales se encontrarían al sur del estado por ser una región en la cual, los hipocentros son muy profundos (Figura 4.14). Igualmente natural, fue sospechar que los mecanismos focales cuyos regímenes tectónicos fueran compresionales; se encontrarían en la región central de Veracruz (Figura 4.13). Lo que fue sorprendente para el autor, fue que los mecanismos focales de corrimiento de rumbo no estuvieran restringidos a la zona centro-norte del estado (por tener ahí sismos poco profundos), sino que la distribución abarca gran parte del estado, tal como se puede apreciar en la Figura 4.15.

Cabe mencionar que la interpretación de las flechas que representan las direcciones principales de los ejes de presión y tensión es la siguiente: cuando dos flechas se aproximan, se describe un mecanismo de tipo inverso en donde dos porciones de terreno se encuentran, acumulan esfuerzos compresionales hasta que uno de ellos cede y es subducido por debajo del otro. En este sentido, la orientación de dichas flechas; representa la dirección del eje principal de presión en donde ocurre dicho fenómeno. Por otro lado, si las flechas se alejan; se tiene un mecanismo focal de tipo normal, en el cual; dos porciones de terreno se separan entre sí por estar sometidos a esfuerzos de tipo tensional. Bajo esta tesis, la orientación de dichas flechas indica la dirección en la que se están separando estas dos porciones de terreno. Finalmente, cuando se tiene un mecanismo focal en donde dominan los regímenes tectónicos de corrimiento de rumbo, el plano nodal se encontrará a 45° de las orientaciones del eje principal de presión y del eje principal de tensión.

Importante también es concluir que, de acuerdo a la Figura 4.13, en el estado de Veracruz se han registrado eventos sísmicos superficiales que poseen una magnitud relativamente significativa y cuyos mecanismos focales se han determinado como inversos.

En el estudio de Suárez (2000), se concluye que la presencia de este tipo de sismos, sugiere que la sismicidad en la corteza puede ser resultado de deformación tectónica en la costa suroeste del Golfo de México. Asimismo, se establece la hipótesis de que esfuerzos compresionales horizontales son transmitidos a la placa continental debido a la subducción de la Placa de Cocos y aparentemente se acentúa en esa región por la presencia del *Tehuantepec ridge*, característica de gran alivio batimétrico en la subducción de la Placa de Cocos. De este modo, la colisión de la cordillera subacuática con la Placa Norteamericana no sólo produce dicha deformación que se refleja en sismicidad, sino también una deflexión hacia el norte de la trinchera y de la línea costera en el Océano Pacífico.

En este sentido, otra contribución importante de este trabajo de investigación, es que hay más eventos compresionales con magnitudes considerables en esta zona, que los reportados en este artículo.

Por otro lado, otra implicación relevante es discutir sobre peligros potenciales para la población dada la presencia del Reactor Nuclear de Laguna Verde en la zona de estudio. Se justificará todo argumento, en base a los resultados arrojados por el presente trabajo de investigación, pero antes, se requiere de ciertas ideas previas, las cuales serán desarrolladas a continuación:

5.2. El Reactor Nuclear de Laguna Verde

La Central Nuclear de Laguna Verde es una de las dos centrales nucleares de generación eléctrica con las que cuenta México, la otra ubicada en el ININ (Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares), en el estado de México y utilizada para investigación; Laguna Verde cuenta con una capacidad de 1,610 MW y se conforma por dos unidades generadoras de 805 MW cada una.

La Central se encuentra ubicada sobre la costa del Golfo de México, en el km 43.5 de la carretera federal Cardel-Nautla, en la localidad denominada Punta Limón, municipio de Alto Lucero de Gutiérrez Barrios, estado de Veracruz. Cuenta con un área de 370 hectáreas y geográficamente se sitúa a 60.8 kilómetros al noreste de la ciudad de Xalapa, 72 km al noroeste de la Ciudad de Veracruz y a 272 km al noreste de la Ciudad de México. El centro urbano más cercano a la Central, vía terrestre, es José Cardel (a 45 kilómetros de distancia). La Central Nuclear Laguna Verde es propiedad del Gobierno Federal de México y es administrada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), a través de la Gerencia de Centrales Nucleoeléctricas. Además, está sujeta a la supervisión de organismos tanto nacionales como

internacionales, que tienen como objetivo asegurar que la Central sea operada de forma segura, cumpliendo con las regulaciones nucleares tanto nacionales como internacionales.

La construcción de la unidad 1 comenzó en octubre de 1976 e inició su operación comercial en 1990. En el caso de la unidad 2, su construcción empezó en 1977 y se integró a la red de potencia eléctrica en 1995.

Desde que la planta entró en operación, se han presentado protestas por parte de varios grupos civiles y organizaciones internacionales, como Madres veracruzanas y Greenpeace. Dichos grupos sostienen que Laguna Verde representa un impacto negativo en el medio ambiente y que opera con medidas inadecuadas de seguridad, por lo que constituiría un peligro potencial para los asentamientos humanos más cercanos a la central. Por su parte, CFE ha negado sistemáticamente este tipo de declaraciones y siempre ha afirmado que la nucleoelectrica no representa ningún riesgo para el ambiente ni para la población ya que opera dentro de los lineamientos de la OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica) y la WANO (World Association of Nuclear Operators).

Cabe mencionar que no son accesibles a la sociedad civil, aquellos estudios con los que CFE se permite negar dichas versiones.

En febrero de 2007, la CFE anunció que planea el aumento de la capacidad instalada de la Central en un 20 por ciento. La licitación internacional para efectuar dicho aumento de potencia fue ganada por la empresa española Iberdrola donde el contrato de OIEA con dicha empresa asciende a 605.04 millones de dólares. [4]

Por otro lado, la Central Laguna Verde, ha sido reconocida nacional e internacionalmente por la excelencia en la gestión, en congruencia a la ejecución de su estrategia y de sus sistemas organizacionales de Clase Mundial, siendo referencia para otras centrales de generación de generación en México y el mundo.

Esta central nuclear obtuvo notoriedad y activó controversias nuevamente ante el accidente de Fukushima, sin embargo; el gobierno tranquilizó a la población asegurando que los reactores instalados en territorio mexicano son seguros, en parte a que las condiciones de sitio en donde se encuentra construida no se asemeja a la de Japón y que el modelo de instalación es más moderna a las que sufrieron daño en Fukushima.

Bajo esta línea, se discutirá sobre dichas aseveraciones desde el enfoque de la sismología, prescindiendo de la parte de diseño ingenieril, pues no es tema que el autor domine:

Al no contar con información pública ofrecida por CFE; se desconoce cómo se determinó que la localidad de Punta Limón era un lugar sísmicamente propicio para dicha instalación. No resulta absurdo suponer que los ingenieros sismólogos encargados del proyecto, basaron su estudio de actividad sísmica en datos proporcionados por el Servicio Sismológico Nacional. El dato más antiguo de esta base, referente a esta región; se encuentra registrado el día 15 de Enero de 1974. Suponiendo que es verdad que este estudio fue basado en ella, sólo contaron con poco más de dos años para concluir que este lugar era el adecuado para construir un

Reactor Nuclear.

De acuerdo a Ordaz (1999), para estimar el riesgo sísmico (los daños) que con cierta frecuencia enfrenta una estructura en un sitio se requiere saber varias cosas: 1) dónde ocurren los temblores potencialmente dañinos; 2) qué tan frecuentemente, 3) cuál es la distribución de los tamaños de estos temblores (cuántos de magnitud mayor que 7, cuántos de magnitud mayor que 8, etc., 4) qué intensidades se producen en el sitio en cuestión si ocurre un temblor con magnitud y posición conocidas y 5) qué daños producirá en estructuras con diseño conocido [16].

En este caso, se sabe que, 1) los sismos potencialmente peligrosos se localizan en la zona sur del estado, a unos 300 kilómetros de la zona de interés, 2) que la frecuencia de ocurrencia de temblores en la región central del estado es muy baja y 3) la distribución de sismos con magnitudes mayores y menores a 4.5 grados (Perfil I y LA Carta Epicentral). Asimismo, al ser tan poco frecuente pero tan superficial la sismicidad en esta región, se desconocen 4) las intensidades que se producirían debido a un sismo. Finalmente, al no ser públicas las investigaciones de CFE, se ignoran las funciones de respuesta de suelos y materiales y por ende, 5) cuáles serían los daños que sufrirían las estructuras.

En este sentido, el autor concluye que ni con dos ni con 38 años de datos, es posible dar una respuesta concreta sobre potenciales daños a la población debido a la presencia de Laguna Verde en el estado de Veracruz dada su actividad sísmica. Por un lado, es un hecho que la sismicidad en esta zona de estudio se caracteriza por ser muy poco frecuente y los eventos sísmicos difícilmente se reportan con magnitudes iguales o superiores a 4.5° pero, por el otro; ésta es muy superficial y eventualmente podrían verse dañadas las estructuras de esta Central Nuclear.

El autor no está contradiciendo a la CFE, pues a lo largo del tiempo; no se reportado ningún incidente de tipo sísmico que represente una alerta significativa a la población, pero sí considera que aún con un estudio basado en la compilación de todos estos años de toma de datos; no es suficiente para dar un veredicto final. No se puede descartar cualquier posibilidad.

Por esta razón, es elemental continuar haciendo investigación para caracterizar de manera más objetiva la sismicidad de esta región.

Finalmente y en términos muy generales, se puede concluir que la sismicidad en el Suroeste del Golfo de México puede clasificarse como de moderada a baja, con actividad sísmica frecuente, profunda y relativamente intensa al sur del estado de Veracruz y actividad somera, poco frecuente y poco intensa en la región centro- norte del mismo.

Asimismo, en esta última región, dominan los mecanismos de ruptura con regímenes tectónicos compresionales mientras que, en la zona sur; dominan los mecanismos focales cuyos regímenes tectónicos de corrimiento de rumbo y de tipo tensionales. De este modo, se ha logrado determinar cómo es la sismicidad y cuáles son los mecanismos de ruptura que caracterizan el Suroeste del Golfo de México.

Bibliografía

- [1] <http://bio4eso.blogspot.mx/2012/11/bordes-destructivos-zonas-de-subduccion.html>.
- [2] http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio//750/975/html/3elmetodo_sismico.html.
- [3] <https://www.dropbox.com>.
- [4] http://www.mexicodiplomatico.org/art_diplomatico_especial/laguna_verde.pdf.
- [5] <http://www.smis.org.mx/hm/sm2.htm>.
- [6] *Boletín del Instituto de Geología*, number 38, 1922.
- [7] <http://www.universetoday.com/26629/radius-of-the-earth/>, Marzo 2009.
- [8] J. Figueroa A. Historia Sísmica y Estadística de temblores en la costa occidental de México. In *Boletín bibliográfico de Geofísica y Oceanografía Americana*, volume 3, pages 107–135.
- [9] Luciana Astiz, Hiroo Kanamori, and Holly Eissler. Source characteristics of Earthquakes in the Michoacan seismic gap in Mexico, 1987.
- [10] Bernard Célérier. Remarks on the relationship between the plunges of the P, B and T axes, the rake of slip, and the dip of the nodal planes of focal mechanism solutions. In *Géosciences Montpellier Université de Montpellier II*.
- [11] Frédéric Ego and Véronique Ansan. Why is the Central trans-Mexican Volcanic Belt (102°-99°W) in transtensive deformation? *Tectonophysics*, (359):189–208, 2002.
- [12] Jeanne L. Hardebeck and Peter M. Shearer. A new method for determining first motion focal mechanism, 2002.
- [13] Jeanne L. Hardebeck and Peter M. Shearer. Using S/P Amplitude Ratios to constrain the focal mechanisms of small earthquakes, 2003.

- [14] Diego Melgar and Xyoli Pérez Campos. Imaging the Moho and Subducted Oceanic Crust at the Isthmus of Tehuantepec, Mexico, from Receiver Functions. *Pure and Applied Geophysics*, 2010.
- [15] Servicio Sismológico Nacional. <http://www.ssn.unam.mx>.
- [16] Mario Ordaz. Curso sobre Diseño y Construcción Sismorresistente de Estructuras. Technical report, CENAPRED, 1999.
- [17] Mario Pardo and Gerardo Suárez. Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: Seismic and tectonic implications, 1995.
- [18] Seth Stein and Michael Wysession. *An introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure*. Blackwell Publishing Ltd., 2003.
- [19] Gerardo Suárez. Reverse faulting in the Isthmus of Tehuantepec: Backarc deformation induced by the subduction of the Tehuantepec ridge. *Geological Society of America*, (334):263–269, 2000.