

CAPITULO III

Procesamiento de datos sísmicos

de la Región de la Sierra Madre

Occidental

III.1. Introducción

Inicialmente se propuso un área de estudio que comprende a la provincia fisiográfica de la SMO y parte de la provincia ígnea conocida con ese mismo nombre y es paralela a la línea de costa que forma México con el mar de Cortez (Figura 3.1). El área se encuentra limitada por el rectángulo que forman los vértices de coordenadas geográficas: a) $28^{\circ} 9' 20.29''$ N, $113^{\circ} 36' 41.39''$ O, b) $31^{\circ} 40' 56.53''$ N, $108^{\circ} 31' 25.58''$, c) $22^{\circ} 7' 36.92''$ N, $100^{\circ} 22' 41.08''$ O y d) $18^{\circ} 52' 29.93''$ N, $105^{\circ} 18' 30.85''$ O. Los lados del área rectangular formada por estos vértices son de longitudes 627.7 km de ancho y 1331.5 km de largo.

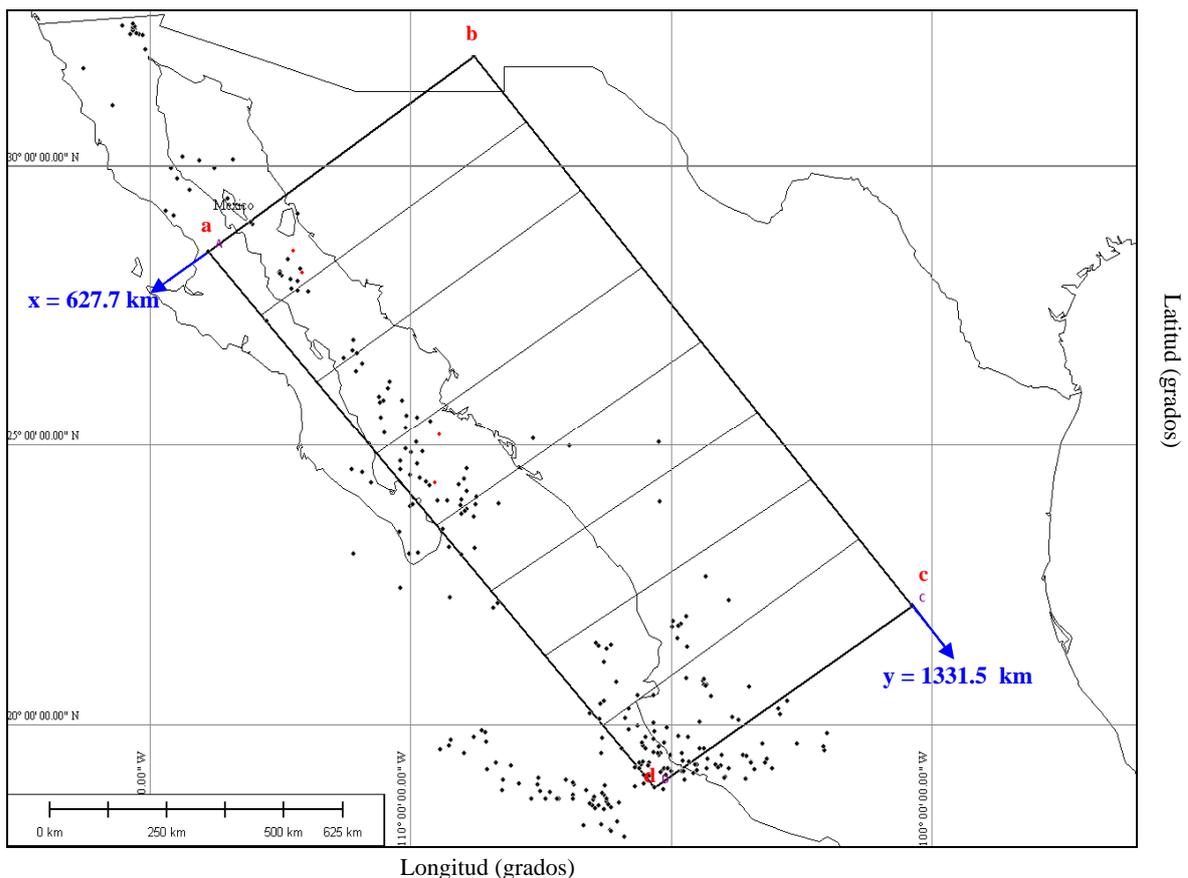


Figura 3.1. El área de estudio propuesta inicialmente comprende a la provincial fisiográfica llamada SMO y parte de la provincial ígnea conocida con el mismo nombre. Se muestra la distribución de la sismicidad en la región. Todos los sismos ocurrieron entre Enero de 1998 y Noviembre de 2009. Las marcas de color negro representan los sismos de magnitud entre 4.0 y 6.0 grados, mientras que las rojas representan los sismos cuya magnitud es mayor a 6.0 grados.

Para determinar la distribución de velocidades utilizando trazado de rayos es necesario conocer la ubicación de los hipocentros de los sismos regionales y contar con un registro que permita leer el arribo de las ondas ya sean P o S para cada evento. La forma de una señal sísmica está determinada por las características de la fuente que la originó, por las características del medio a través del cual se propagan las ondas sísmicas y por la respuesta del instrumento de medición al movimiento.

En el presente capítulo, se describe un modelo de velocidades para los cinco planos definidos anteriormente; a partir de estos planos se construyó, con el programa Ray3D, el modelo de velocidades en tres dimensiones y se hace un análisis cualitativo de las señales que permitieron la construcción de la estructura de velocidades presentada en este trabajo.

III.2. Sismicidad y selección de datos en la SMO

En la figura 3.1 se muestra la distribución de los epicentros localizados dentro de la zona de estudio, los sismos ocurrieron en el lapso comprendido entre el primero de Enero de 1998 hasta Noviembre de 2009 y su magnitud es mayor a 4.0; se observa que la mayor cantidad de sismos se localizan en el mar de Cortez, en el territorio marino que pertenece a los estados de Baja California Sur y Jalisco.

Los sismos utilizados en la construcción del modelo de velocidades que presentamos en este trabajo son sismos de magnitud igual o mayor a 5.0, esto debido a que los registros de eventos con estas características presentan arribos de onda más claros que aquellos de magnitud menor, además de que los registros se graban en un mayor número de estaciones. Otro criterio de selección fue la ubicación geográfica de los hipocentros; se escogieron aquellos cuya trayectoria permitiera “mapear” la estructura en su totalidad, sin embargo, la falta de datos en algunas estaciones propició que el margen de selección de datos se hiciera estrecho: la estación ZAIG hasta 2007 solo grababa por disparo y las estaciones CGIG y HPIG comenzaron a funcionar en Diciembre del 2006.

Se seleccionaron los eventos que cumplieron con los criterios antes mencionados, el objetivo es tener un número considerable de trayectorias propagándose a través de la zona de estudio. Estas trayectorias presentan diferente ángulo de salida y dirección acimutal, esto permitió obtener información relativamente abundante de la estructura de velocidades. La Tabla 3.1 muestra la fecha, las coordenadas geográficas, magnitud, profundidad y nomenclatura de los eventos sísmicos que cumplieron con los criterios de selección de datos.

Tabla 3.1. Sismos que cumplieron con los criterios de selección de datos para la construcción del modelo de velocidades

Evento/nombre	fecha	latitud (N)	longitud (O)	magnitud	prof. (km)
1 / S1	13-Mar-07	26°27'36"	110° 55' 12"	5.8	19
2 / S2	01-Sep-07	24°19'48"	109° 31' 48"	6.3	2
3 / S5	06-Sep-07	19° 23' 24"	105° 24' 36"	5.2	25
4 / S3	05-Ene-09	23°49'12"	108° 56' 24"	5.6	19
5 / S4	03-Ago-09	29° 2'24"	112° 54'	5.8	10

La figura 3.2 muestra la ubicación espacial de estos cinco sismos y de las estaciones que registraron los eventos, así como una vista aérea de las trayectorias seguidas por las ondas sísmicas a cuyo registro se tuvo acceso.

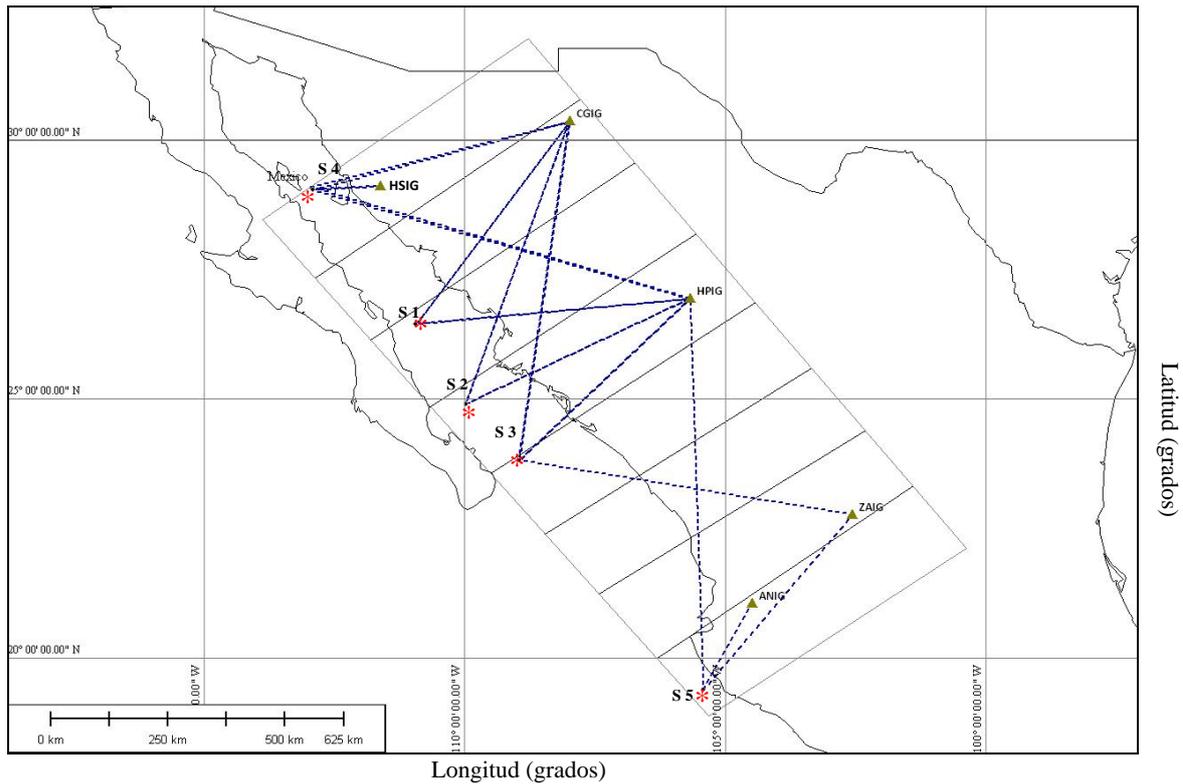


Figura 3.2. Ubicación de las estaciones sismológicas CGIG, HPIG, HSIG y ZAIG de la red de banda ancha del SSN, de los sismos que cumplen con los criterios de selección de datos y del área originalmente propuesta para construir el modelo de velocidades. Se muestra además una vista en planta de las trayectorias seguidas por los rayos sísmicos a utilizarse en el trazado de rayos.

Es evidente que existen pocos registros sísmicos en la zona sur del área de estudio; la certidumbre de la metodología de trazado de rayos radica en contar con un número considerable de trayectorias propagándose en el medio, es por ello que en este trabajo no fue posible proponer una estructura de velocidades para dicha zona. Por tanto, se restringió el área de estudio a aquella formada por los vértices de coordenadas geográficas: A) 28°28'13.19"N, 113°51'59.24"O, B) 31°58'13.89"N, 108°46'17.58"O, C) 26°39'18.73"N, 104° 1'3.41"O, y D) 23°16'16.61"N, 109° 2'49.79"O (Figura 3.3).

Los eventos utilizados en la construcción del modelo corresponden a sismos someros. Los sismogramas utilizados en la construcción del modelo de velocidades fueron grabados en las estaciones CGIG, HPIG y HSIG de la red de banda ancha del Servicio Sismológico Nacional (Figura 3.3). Las estaciones tienen instalados sensores de velocidad STS-2 y acelerómetros Epicensor, ambos de tres componentes con una tasa de muestreo de 100 datos por segundo. Las coordenadas geográficas de las estaciones sismológicas que grabaron los eventos que cumplieron con los criterios de selección de datos y que se encuentran dentro de la zona de estudio se muestran a continuación:

Tabla 3.2. Estaciones sismológicas pertenecientes a la red de banda ancha del SSN

estación	latitud (N)	Longitud (O)
CGIG	30°21'54''	107°58'38''
HPIG	26°56'06''	105°39'55''
HSIG	24°34'48''	108°55'12''

El área de estudio se dividió en cuatro segmentos de igual tamaño limitados por cinco perfiles paralelos entre sí a lo largo de la zona de estudio. Se cuenta con los registros de los cuatro eventos sísmicos que cumplieron con los criterios de selección y que se encuentran dentro del área, estos fueron grabados en las estaciones CGIG y HPIG, adicionalmente se cuenta con el registro del evento S4 de la estación HSIG (Figura 3.3).

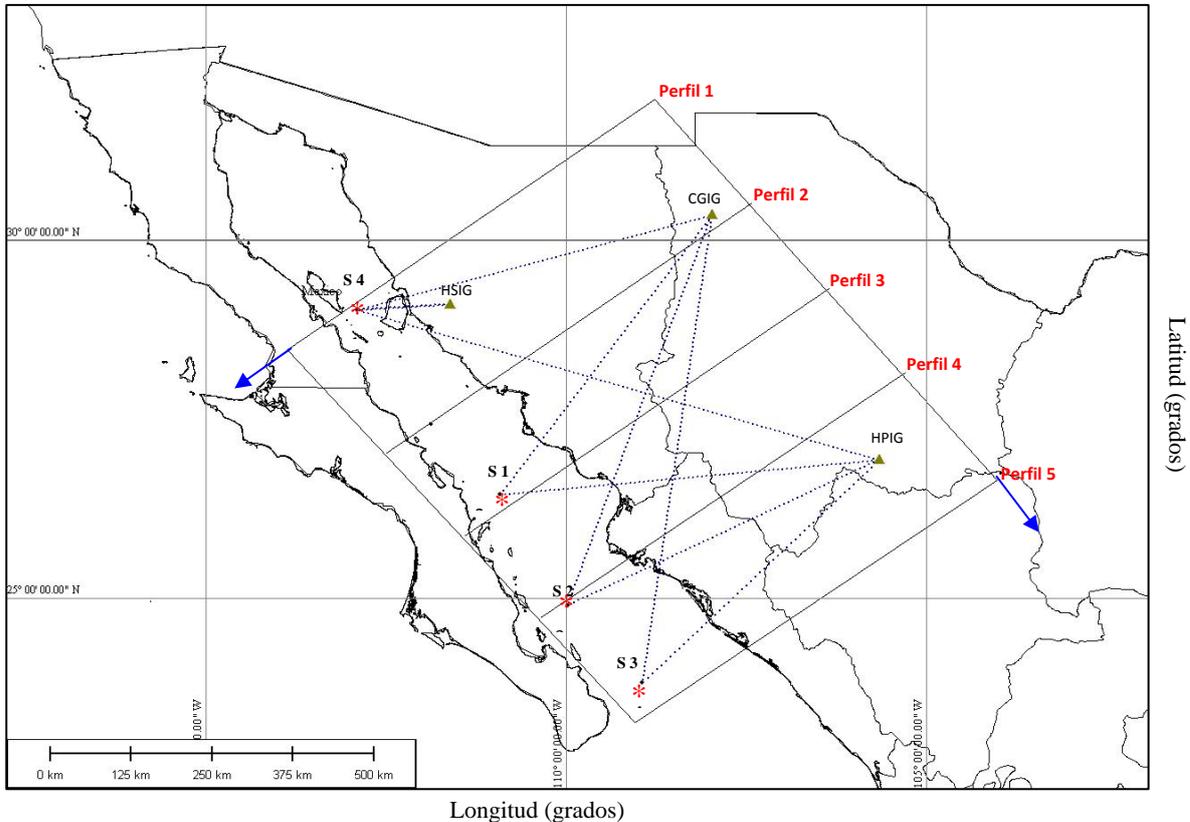


Figura 3.3. Ubicación de las estaciones sísmológicas comprendidas dentro del área de estudio y en las cuales se grabó el sismograma de los eventos S1, S2, S3 y S4. Las líneas punteadas son una vista en planta de las trayectorias seguidas por los rayos sísmicos desde el hipocentro hasta la estación en la cual fueron grabados.

La estructura de velocidades se construyó haciendo una interpolación entre los planos definidos los cuales poseen un modelo de velocidades diferente. El perfil 1 inicia a pocos kilómetros de la frontera entre México y Estados Unidos, al norte del límite entre los estados de Chihuahua y Sonora y termina al norte de Baja California Sur (BCS). El perfil 2 comienza a 40 km al oriente de Nuevo Casas Grandes Chihuahua y termina a 75 km al suroeste de Isla Tortuga, BCS. El perfil 3 tiene su inicio a 83 km al norte de Chihuahua, Chihuahua, y se prolonga hasta la costa, a 14 km al suroeste de Loreto, BCS. El perfil 4 inicia a 18 km en dirección sureste de Ciudad Delicias, Chihuahua y termina a 18 km al norte de Isla Perdida en BCS. Por último, el perfil 5 comienza al sur del límite entre Chihuahua y Durango, a 160 km al sureste de Hidalgo del Parral, Chihuahua, termina al sureste del extremo sur de la Península de Baja California.

III.3. Análisis cualitativo de señales

De manera simplificada, un sismograma es resultado de la convolución de la fuente con una función de reflectividad. Es posible demostrar que un sismograma es resultado de:

$$u(t) = x(t) * e(t) * q(t) * i(t) \quad \dots\dots (4.1)$$

donde $x(t)$ es la función de la fuente, la ‘señal’ que el sismo emitió al medio, $e(t)$ y $q(t)$ representan los efectos de la estructura de la tierra y por último $i(t)$ que describe la respuesta del sismómetro (Stein, 2003). En la formulación que hace Stein (2003), los efectos debidos a la estructura de la tierra son dos: $e(t)$ que es el efecto de las reflexiones y conversiones de las ondas sísmicas provocadas por las interfaces a lo largo de la trayectoria y el efecto de la dispersión geométrica de los rayos debido a la estructura de velocidad y $q(t)$ que describe la atenuación inelástica a través de la cuál parte de la energía mecánica de las ondas sísmicas se transforma en calor.

La metodología de trazado de rayos utilizada se interesa primordialmente en la influencia que tiene la estructura de velocidades en las trayectorias (tiempos de arribo, geometría de los rayos sísmicos, etc.) y en las amplitudes de la señal.

Un análisis cualitativo de los registros permitirá observar qué tan homogéneo es el medio a través del cual viajó la onda sísmica, por ejemplo, si se observa los sismogramas del evento 1 (Figura 3.4), notaremos que su forma es diferente a pesar de que las distancias entre el epicentro y cada estación son muy similares, y por otro lado, en ambos registros las amplitudes de la onda son muy similares.

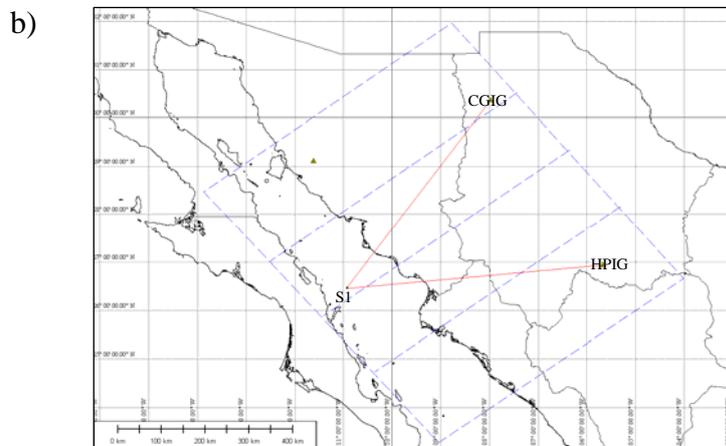
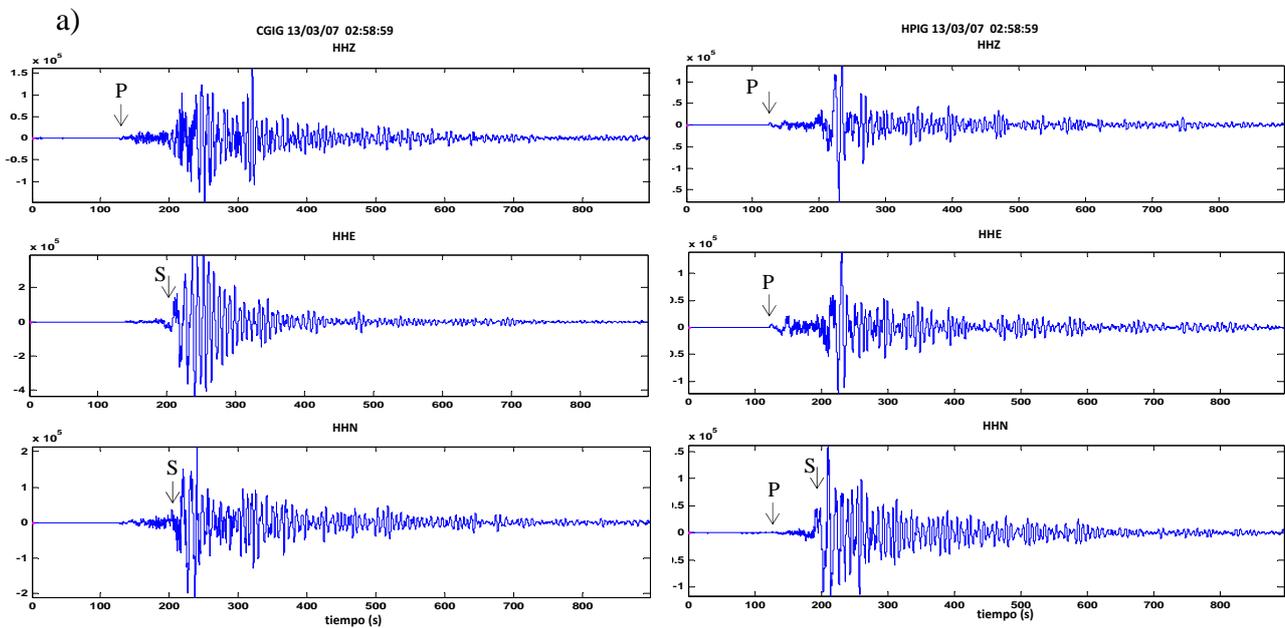


Figura 3.4. Evento 1 (13-Mar-07) registrado a distancias epicentrales similares. a) sismogramas grabados en las estaciones HPIG y CGIG de la red de banda ancha del SSN, se observa diferencia en la forma de la señal, sin embargo, las amplitudes y la duración de los registros son muy similares. La diferencia en la forma se debe en buena parte a las características del medio a través del cual viajó la onda. b) vista en planta de las trayectorias seguidas por la onda grabada en las estaciones CGIG y HPIG para el evento 1.

El mismo análisis cualitativo puede hacerse para los registros del evento 4 de las estaciones HSIG, CGIG y HPIG. Para la estación HSIG las amplitudes son mayores que las de los registros de las estaciones CGIG y HPIG debido a que se encuentra más cercana a la fuente. La diferencia en la forma de la señal en cada registro es mas evidente que para los registros del evento 1 debido a que las distancias epicentrales son muy diferentes, lo que sugiere diferencias mas grandes en la estructura del subsuelo.

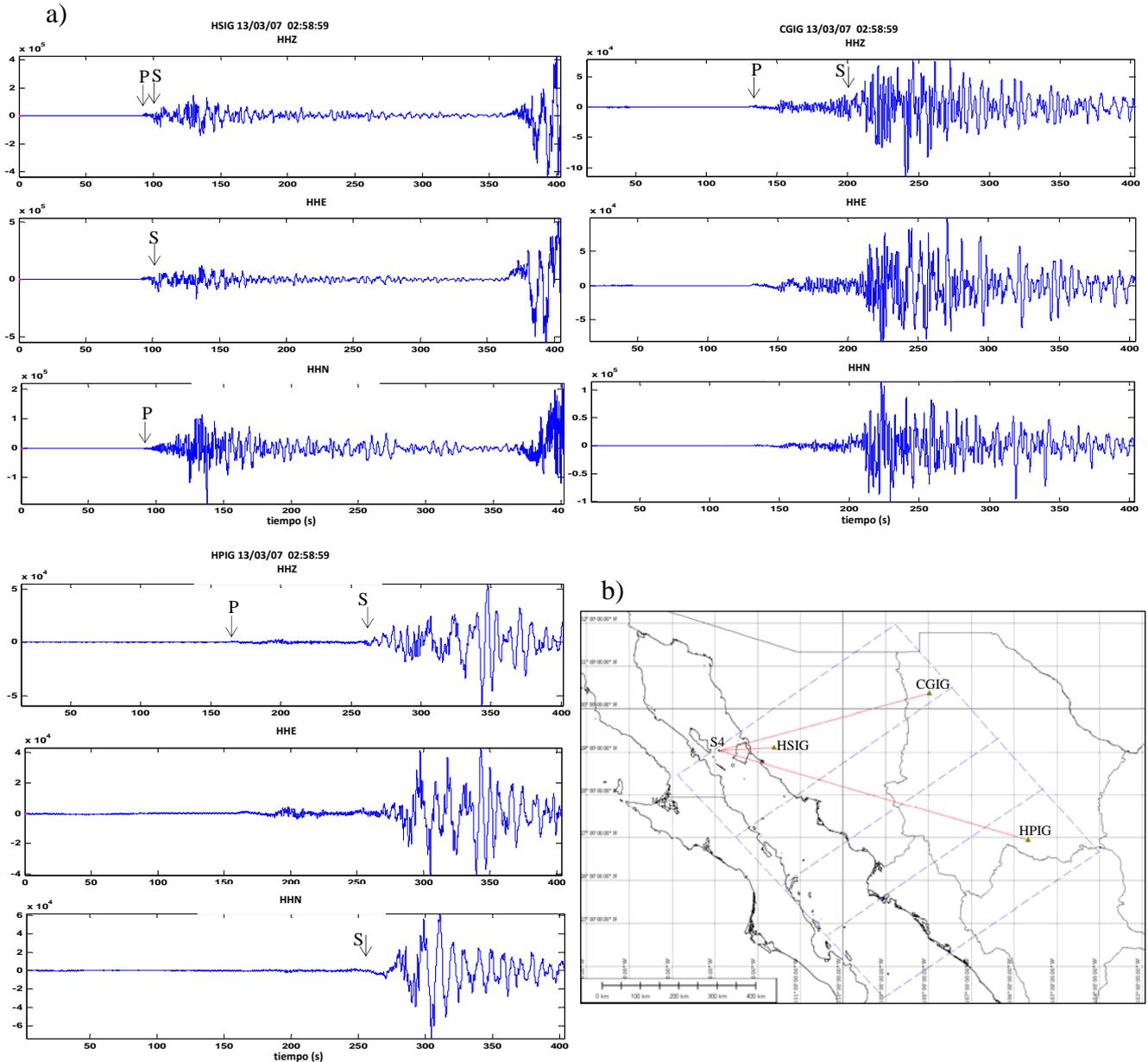


Figura 3.5. Evento 4 (03-Ago-09) registrado a diferentes distancias epicentrales. Las primeras imágenes corresponden a los sismogramas grabados en las estaciones HSIG, CGIG y HPIG. El registro grabado en HSIG presenta una amplitud mayor que los registros grabados en CGIG y HPIG. Se presenta una vista en planta del sismo y las estaciones en donde fue grabado. El conjunto de ondas que se observa a los 350 (s) del primer registro corresponden al arribo de las ondas de cuerpo de un segundo sismo ocurrido minutos después del sismo analizado.

Por otro lado, la lejanía de las estaciones con respecto a hipocentro dificulta la lectura de las fases en un registro sísmico como puede verse en la Figura 3.5a, en donde la estación HPIG contiene gran cantidad de ruido que, a la lejanía, podría enmascarar los

arribos de las ondas de cuerpo. Para los registros de las estaciones HSIG y CGIG los arribos pueden verse con mayor claridad (Figura 3.5).

III.4. Construcción de la estructura inicial de velocidades.

La estructura tridimensional de velocidades que sirvió como modelo inicial en esta investigación fue construido con datos propuestos por varios autores, cada autor realizó estudios de naturaleza diferente para conocer el espesor cortical o la velocidad de propagación de ondas en zonas específicas dentro del área de estudio; los resultados obtenidos por estos autores son compilados en el Capítulo I y juntos proporcionan una idea general y aproximada de la estructura completa.

El modelo inicial propuesto tiene como característica fundamental que la corteza por debajo de la SMO es más gruesa que en los extremos, todos los autores coinciden en la existencia de una raíz litosférica por debajo de la SMO que no sufrió acortamiento significativo durante la extensión terciaria y un notable acortamiento en el espesor cortical en la zona del Golfo de California, además proponen una zona anómala de baja velocidad en el manto superior.

En general, si un registro sísmico es de buena calidad, permite distinguir claramente las fases P y S. Los arribos de estas ondas son comparados con tiempos de arribo teóricos. En el presente trabajo sólo se llevó a cabo el análisis para las ondas compresivas, queda pendiente validar el modelo, entre otros métodos, con un análisis de ondas de corte.

La metodología empleada en la obtención del modelo de velocidades tuvo como base el programa "Ray3D"; el programa creado por Valdés *et. al.* es una rutina de trazado de rayos que permite generar rayos sísmicos calculando su trayectoria y el tiempo de viaje empleado para recorrerla. Se lanza un haz de rayos con una dirección azimutal tal que sea posible que al menos un rayo llegue a la estación en donde se registró el sismo y se localiza el rayo más próximo a la estación, una vez localizado dicho rayo, el tiempo de viaje de la onda P (calculado por el programa Ray3D) se compara con el tiempo de arribo leído en los sismogramas grabados en las estaciones.

La aproximación al modelo real se considera buena si la diferencia entre el tiempo calculado y el tiempo leído es mínima, para este caso, esa diferencia debe ser menor a un segundo lo que representa una estimación de la precisión de la localización del hipocentro, así como la incertidumbre en los espesores y velocidades del modelo. Si el residual resulta ser mayor a este tiempo, se ajustan los espesores de las capas o los valores de velocidad para hacer el cómputo del tiempo de viaje nuevamente, de esta forma se encuentra el modelo de velocidades que mejor ajuste a los tiempos leídos.

III.5. Estructura tridimensional de velocidades obtenida para la SMO

El programa Ray3D utiliza una malla tridimensional que contenga las características de la estructura a partir de la cual se construirá el modelo final de velocidades, este modelo puede ser construido manualmente o con el programa PROMODEL desarrollado por Valdés *et. al.* en 1988, dicho programa crea la malla tridimensional y permite manipular información como las coordenadas del hipocentro, la dirección y densidad del haz de rayos sísmicos.

El programa Ray3D proporciona una salida que contiene el punto inicial de las trayectorias del haz de rayos sísmicos y el punto final de cada una de estas, el tiempo de arribo de la fase P, la dirección acimutal del rayo desde el hipocentro hasta la estación en donde se grabó el sismo, el ángulo de salida respecto a la vertical y las soluciones de las ecuaciones cinemáticas del rayo ω_1, ω_2 y ω_3 (ecuación 3.7) para cada instante de tiempo.

Los cuatro sismos utilizados permitieron cubrir la zona razonablemente bien, sin embargo para tener mayor certidumbre es necesario contar con más registros de sismos locales.

La metodología de trazado de rayos utilizada comienza con la lectura del arribo de la onda P en cada registro, para hacerlo se aplicó en la mayoría de los casos, un filtro pasa altas cuyas frecuencias de corte se encuentran en el rango de 0.3 a 0.5 Hz debido a que se trata de sismos regionales.

Después del ajuste sistemático de los valores de velocidad de las ondas compresionales y del espesor de las capas por debajo de la SMO, se obtuvo un modelo de velocidades que cumpliera con la condición de que la diferencia entre el tiempo leído y tiempo teórico (t_r-t_a) sea menor a un segundo. La comparación entre estos dos parámetros se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Muestra la relación tiempo leído - tiempo teórico

Sismo	fecha	estación	t_r (s)	t_a (s)	$t_r-t_a=dt$ (s)	e (%)
1	13-Mar-07	CGIG	71.808	70.729	1.08	1.53
		HPIG	69.348	70.534	-1.19	-1.68
2	01-Sep-07	CGIG	86.018	86.912	-0.89	-1.03
		HPIG	64.64	65.734	-1.09	-1.66
3	05-Ene-09	CGIG	94.448	95.38	-0.93	-0.98
		HPIG	61.097	62.17	-1.07	-1.73
4	03-Ago-09	CGIG	69.128	70.989	-1.86	-2.62
		HPIG	101.818	100.947	0.87	0.86
		HSIG	28.258	28.089	0.17	0.60

Tabla 3.3. t_r =tiempo leído, t_a =tiempo ajustado, $dt=t_r-t_a$, e=error en función de la diferencia dt y del tiempo total de viaje. El modelo se considera bueno si dt es menor a 1(s).

La Tabla anterior contiene el tiempo leído (en los sismogramas), el tiempo teórico (calculado con el programa Ray3D a partir del modelo de velocidades propuesto) y el error generado por la diferencia entre ambos. El ajuste entre los tiempos es bueno, el promedio de los dt es de -0.54 (s) con una desviación estándar de 1.0.

El modelo tridimensional de velocidades resultante del trazado de rayos es una estructura compleja que consta de 5 capas principales, las dos primeras corresponden a velocidades características de la corteza continental (6.2 y 6.6 km/s) mientras que las tres últimas corresponden a valores de velocidad más altos (7.8, 8 y 8.2 km/s), lo que puede indicar que los sismos utilizados en la construcción del modelo llegaron hasta el manto.

III.5.1 Descripción de la estructura de velocidades obtenida

El modelo se propuso inicialmente como un modelo continuo de capas planas y, utilizando la metodología de trazado de rayos, se modificaron sistemáticamente las velocidades y los espesores de las capas hasta obtener un modelo que ajustara razonablemente al tiempo de viaje de las trayectorias seguidas por los sismos.

El trazado de rayos permite definir un modelo de velocidades para planos paralelos e interpolar la estructura entre estos. En este trabajo proponemos un modelo para cada perfil definido (Figuras 3.3 y 3.11) y un modelo en tres dimensiones de la estructura de velocidades por debajo de la SMO. Después del análisis de trazado de rayos, y una vez obtenido un modelo de velocidades para las ondas P, se presentan los siguientes resultados.

El modelo de velocidades consta de cinco capas continuas a lo largo de la estructura, las dos primeras tienen velocidades propias de la corteza y sus valores son de 6.2 km/s y 6.6 km/s, la tercer capa con valor de 7.8 km/s puede ser indicativo de la presencia de manto litosférico, una cuarta capa con velocidad de 8.0 km/s las subyace, y por último se encuentra la capa de velocidad 8.2 km/s que podría ser indicativo de la presencia de manto astenosférico.

La estructura de velocidades propuesta para el perfil 1 se muestra en la Figura 3.6, este perfil se ubica en la zona norte del área de estudio. En el corte transversal se observan: la capa I con velocidad de 6.2 km/s y 41 km de espesor, la capa II con velocidad de 6.4 km/s cuyo límite inferior se encuentra a 44 km de profundidad, la capa III con velocidad de 6.6 km/s y espesor aproximado de 2 km, la capa IV de aproximadamente 5 km de espesor y con velocidad de 7.8 km/s, la capa V con velocidad de 7.9 km/s y espesor aproximado de 3 km, la capa VI de velocidad 8.0 km/s y espesor aproximado de 7 km y, por último, la capa VII de velocidad igual a 8.2 km/s que se extiende desde los 60 km de profundidad hasta por lo menos a los 80 km.

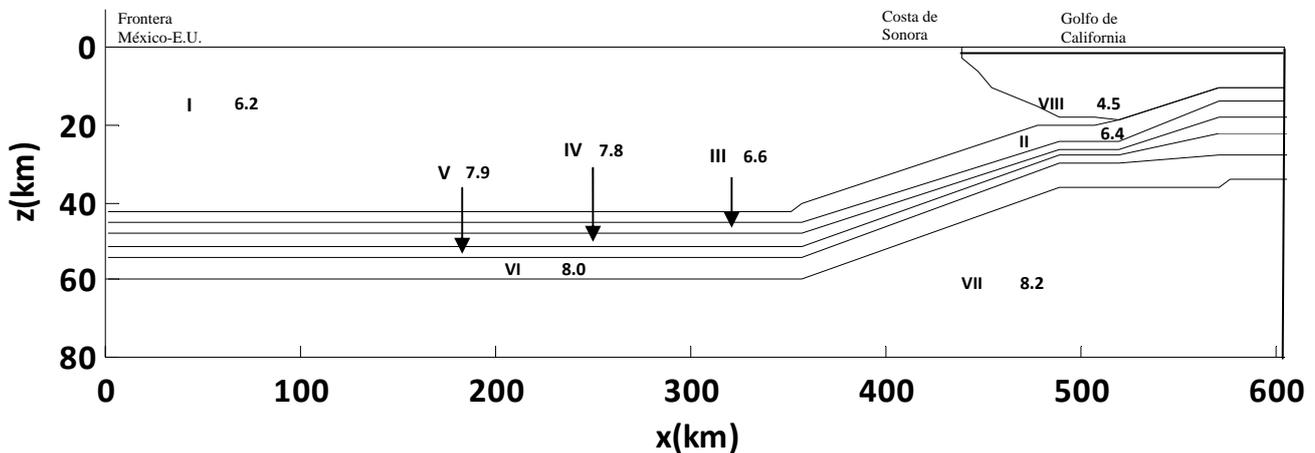


Figura 3.6. Estructura de velocidades propuesta para el perfil 1 (ver Figura 3.3). Se observa adelgazamiento de la corteza en la zona del Golfo de California. La capa I corresponde a la capa de velocidad $V_p=6.2$ km/s, la velocidad de la capa II: $V_p=6.4$ km/s, la velocidad de la capa III: $V_p=6.6$ km/s, velocidad de la capa IV: $V_p=7.8$ km/s, velocidad de la capa VI: $V_p=8.0$ km/s, velocidad de la capa VII: $V_p=8.2$ km/s y para la corteza oceánica del mar de Cortés: $V_p=4.5$ km/s. En el eje x se mide la distancia desde el punto inicial del perfil hasta su final. En el eje Z, la profundidad, ambos medidos en kilómetros.

A pesar de que no se cuenta con datos que proporcionen información en el inicio del perfil, el modelo presentado es consistente con los resultados propuestos por Gombert *et. al.* en 1989 quienes proponen, para la región fronteriza, una velocidad P_n entre los 7.8 y 7.95 km/s y un espesor cortical de 36 km aproximadamente; en el otro extremo del perfil, al norte de Hermosillo, Sonora, el espesor de la corteza es de aproximadamente 24 km y para la corteza oceánica por debajo del mar de Cortés (zona VIII) se propone una velocidad de 4.5 km/s.

El perfil 2 (Figura 3.7) comienza en el noroeste de Chihuahua y atraviesa Sonora. La corteza, para la zona de Nuevo Casas Grandes, la conforman tres capas: la capa I cuyo espesor es de 30km aproximadamente, la capa II a una profundidad de 32 km y espesor de 4 km y, la capa III que se encuentra a 36 km de profundidad con un espesor de 2 km. Por debajo de la corteza se encuentran, para esta zona, la capa IV con espesor

aproximado de 14 km, la capa VI de 12 km de espesor y la capa VII que comienza en los 66 km; con el análisis de trazado de rayos realizado en este trabajo de tesis no es posible conocer la profundidad hasta la cual se extiende la última capa.

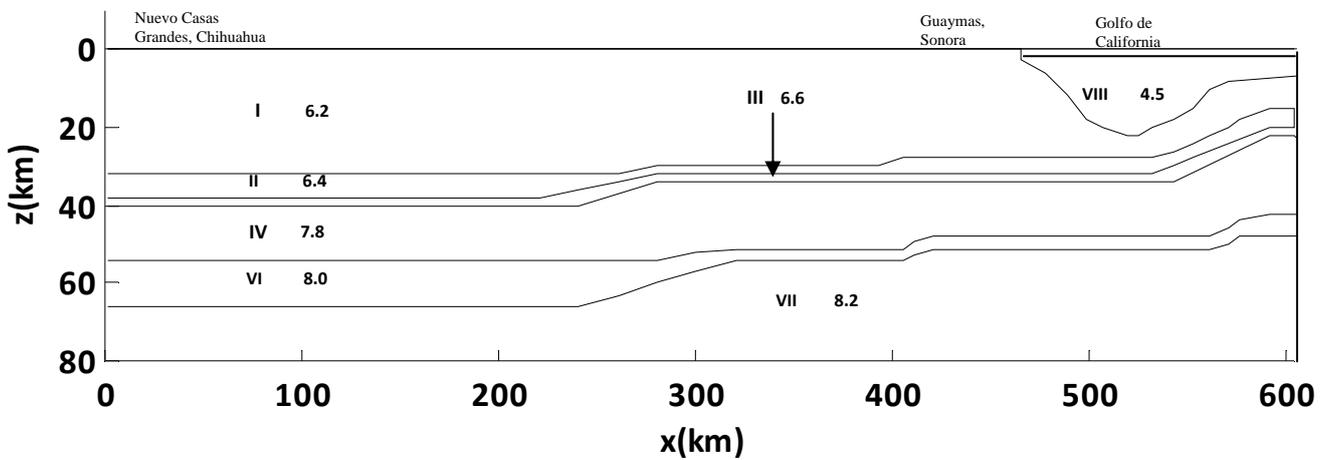


Figura 3.7. Estructura de velocidades propuesta para el perfil 2 (ver Figura 3.3). Se observa adelgazamiento de la corteza en la zona del Golfo de California. La capa I corresponde a la capa de velocidad $V_p=6.2$ km/s, la velocidad de la capa II: $V_p=6.4$ km/s, la velocidad de la capa III: $V_p=6.6$ km/s, velocidad de la capa IV: $V_p=7.8$ km/s, velocidad de la capa VI: $V_p=8.0$ km/s, velocidad de la capa VII: $V_p=8.2$ km/s y para la corteza oceánica del mar de Cortés: $V_p=4.5$ km/s. En el eje x se mide la distancia desde el punto inicial del perfil hasta su final. En el eje Z, la profundidad, ambos medidos en kilómetros.

Se propone para la corteza por debajo de Nuevo Casas Grandes un espesor de 38 km, mientras que para la costa no es posible proponer un espesor cortical alguno debido a que no se cuentan con registros de las trayectorias de los rayos viajando en esa zona, sin embargo, el modelo es consistente con un espesor de 28 km propuesto por Persaud en 2003 y también con la teoría generalizada de que la corteza se adelgaza en la zona costera.

El modelo de velocidades para el perfil 3 se muestra en la figura 3.8, se trata de un modelo para la zona centro de Chihuahua y la costa sur de Sonora.

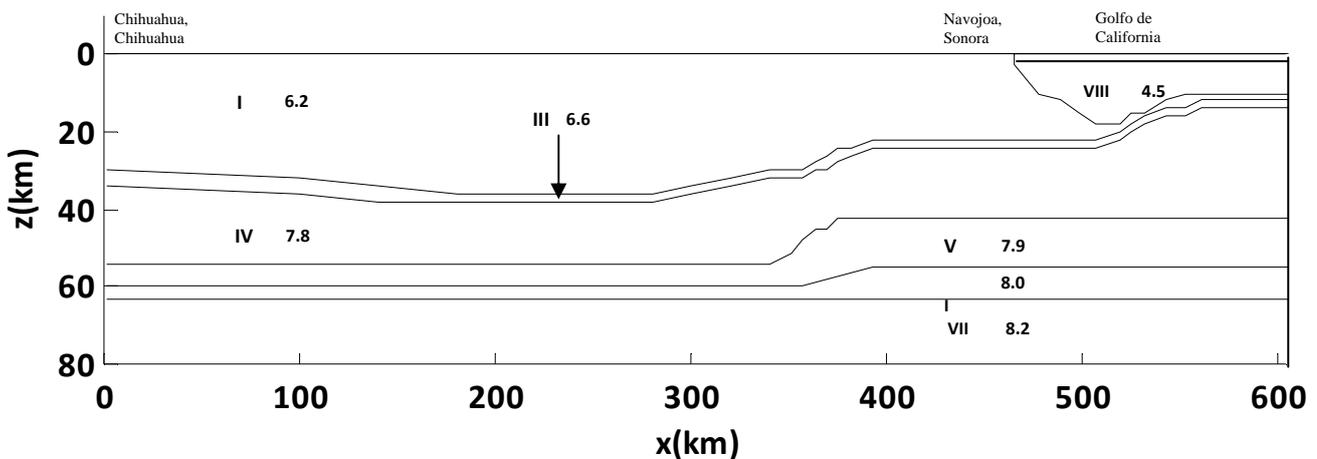


Figura 3.8. Estructura de velocidades propuesta para el perfil 3 (ver Figura 3.3). Se observa adelgazamiento de la corteza en la zona del Golfo de California. La capa I corresponde a la capa de velocidad $V_p=6.2$ km/s, la velocidad de la capa III: $V_p=6.6$ km/s, la velocidad de la capa IV: $V_p=7.8$ km/s, la velocidad de la capa V: $V_p=7.9$ km/s, la velocidad de la capa VI: $V_p=8.0$ km/s, la velocidad de la capa VII: $V_p=8.2$ km/s y para la corteza oceánica del mar de Cortés: $V_p=4.5$ km/s. En el eje x se mide la distancia (km) desde el punto inicial del perfil hasta su final. En el eje Z, la profundidad (km)

Las capas que se distinguen en el perfil son seis: la capa I de velocidad 6.2 km/s con un espesor posible de 22 a 34 km, la capa III con un espesor de 2 km, la capa IV de aproximadamente 16 km de espesor en el inicio y 12 km para el centro y final del perfil, la capa V de 3 km de espesor al inicio y 10 km en la parte final, la capa VI con 3 km de espesor por debajo de Chihuahua y 8 km hacía la zona costera y, la capa VII que comienza a los 66 km de profundidad y se extiende más allá del alcance de este modelo. El espesor cortical es de aproximadamente 30 km al inicio del perfil, de 36 km para la zona centro y de 24 km para la zona costera.

El perfil 4 (Figura 3.9) se compone de seis capas, la primera es la capa I, tiene un espesor de 18 km al inicio del perfil, de 21 km en la zona centro y de 15 km al final; la segunda es la capa III, con un espesor de 20 km al inicio del perfil, de 25 km en el núcleo de la SMO y de 10 km para la zona costera; la tercera capa, IV, subyace a la corteza, posee un espesor de 15 km al inicio del perfil y se adelgaza hacia la línea de costa; la cuarta capa es V, posee un espesor aproximado de 6 km; la quinta capa, VI, posee un espesor aproximado de 3 km; por último, la capa VII, se encuentra a 63 km de profundidad en Ciudad Delicias y a 42 km en Los Mochis.

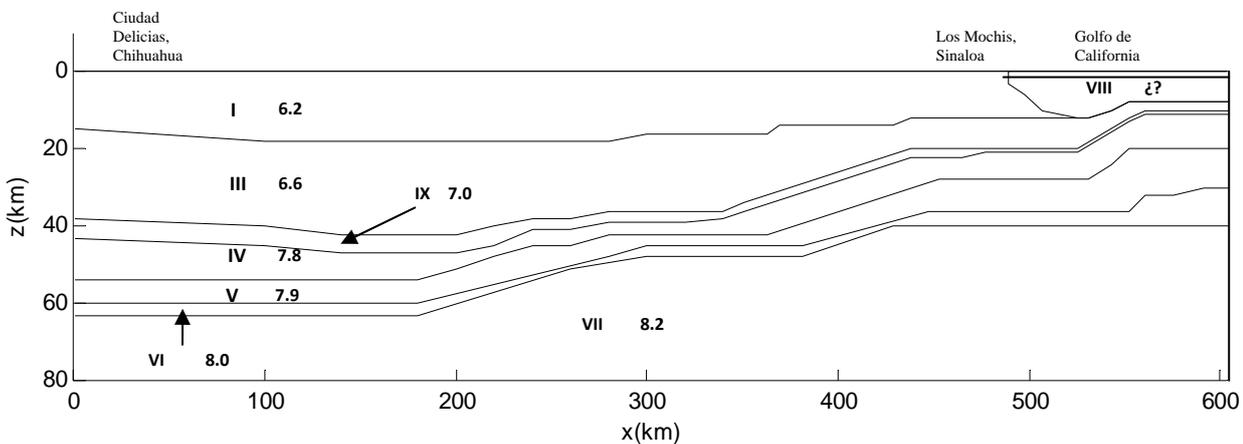


Figura 3.9. Modelo de velocidades propuesto para el perfil 4 (ver Figura 3.3). Se observa adelgazamiento de la corteza en la zona del Golfo de California. La capa I corresponde a la capa de velocidad $V_p=6.2$ km/s, la velocidad de la capa III: $V_p=6.6$ km/s, la velocidad de la capa IV: $V_p=7.8$ km/s, la velocidad de la capa V: $V_p=7.9$ km/s, la velocidad de la capa VI: $V_p=8.0$ km/s, la velocidad de la capa VII: $V_p=8.2$ km/s, la velocidad de la capa IX: $V_p=7.0$ km/s y para la corteza oceánica del mar de Cortés: $V_p=4.5$ km/s. En el eje x se mide la distancia desde el punto inicial del perfil hasta su final. En el eje Z, la profundidad, ambos medidos en kilómetros.

En el perfil 4 se observa el engrosamiento de la capa III con respecto a los perfiles 1, 2 y 3. El espesor cortical es de aproximadamente 38 km al inicio, de 46 km para la zona centro y de 25 km para la zona costera.

El perfil 5, constituido por seis capas, se muestra en la Figura 4.5. La primera capa, I, posee un espesor de 15 km al inicio del perfil y de 20 km en la parte central; la capa II, que representa el límite inferior de la corteza, tiene un espesor de 20 km en su parte central; la tercera capa, IV, posee un espesor de aproximadamente 3 km; la capa V tiene un espesor aproximado de 2 km en buena parte del perfil; por debajo, la capa VI, con espesor de 6 km; por último la capa VII, cuyo límite superior se encuentra, a 54 km de profundidad por debajo Chihuahua y Durango, a 45 km en la zona costera cercana a Culiacán y a 25 km en el Mar de Cortés.

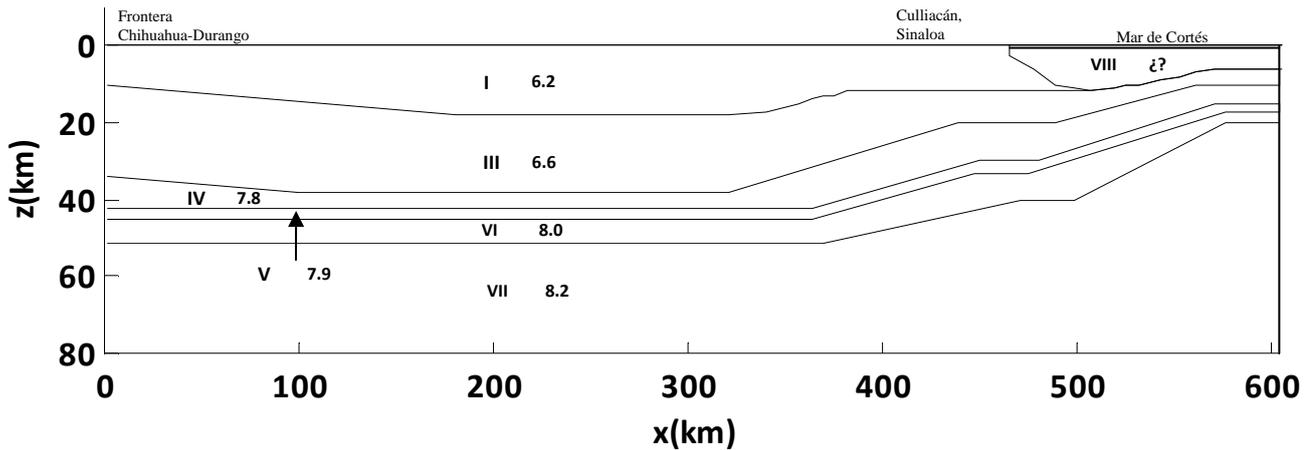


Figura 3.10. Modelo de velocidades propuesto para el perfil 5 (ver Figura 3.3). Se observa adelgazamiento de la corteza en la zona del Golfo de California. La capa I corresponde a la capa de velocidad $V_p=6.2$ km/s, la velocidad de la capa III: $V_p=6.6$ km/s, la velocidad de la capa IV: $V_p=7.8$ km/s, la velocidad de la capa V: $V_p=7.9$ km/s, la velocidad de la capa VI: $V_p=8.0$ km/s, la velocidad de la capa VII: $V_p=8.2$ km/s y para la corteza oceánica del mar de Cortés: $V_p=4.5$ km/s. En el eje x se mide la distancia desde el punto inicial del perfil hasta su final. En el eje Z, la profundidad, ambos medidos en kilómetros.

Se determinó que el espesor cortical, por debajo de Hidalgo del Parral y de la frontera Chihuahua-Durango de 38 km, por debajo del núcleo de la SMO de 40 km y, por debajo de Culiacán, de 20 km.

El modelo de velocidades propuesto es verificable únicamente a lo largo de la trayectoria recorrida por los rayos sísmicos, debido a esto, existen zonas en donde no se conoce la estructura de velocidades a ciencia cierta, sin embargo, se puede llegar a una aproximación partiendo de la premisa de que la estructura se comporta como un medio continuo (Figura 4.6).

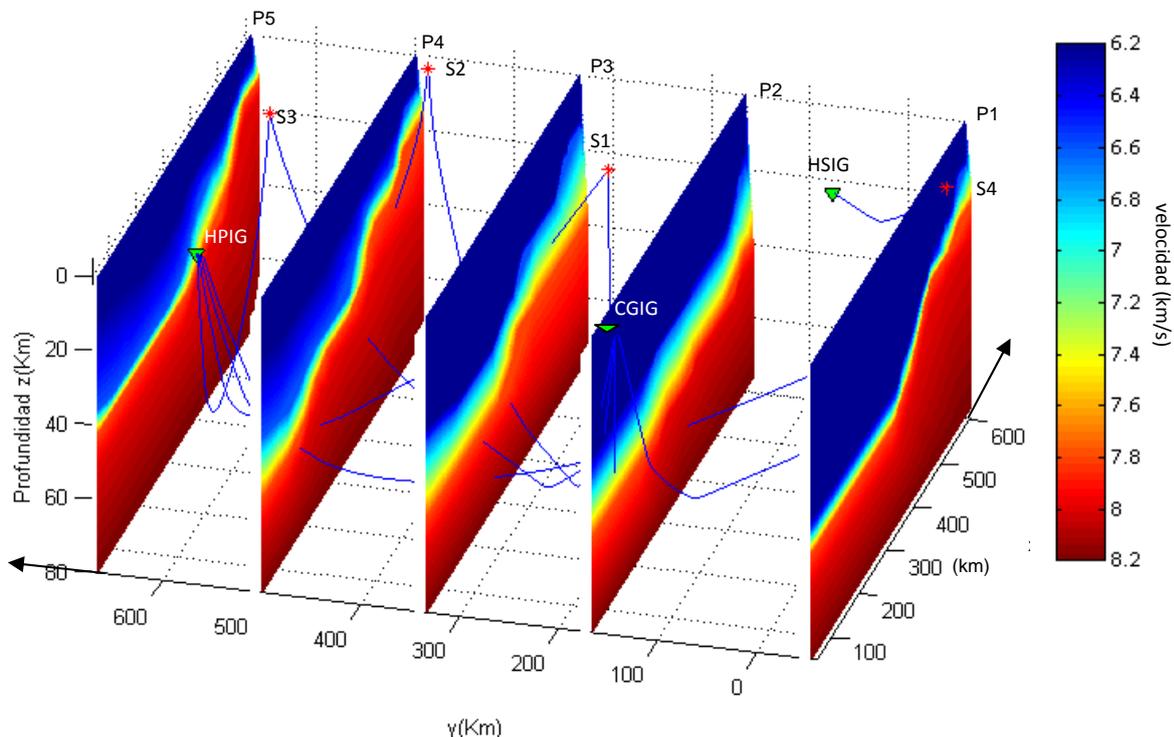


Figura 3.11. La figura muestra las trayectorias seguidas por los rayos sísmicos utilizados en la construcción del modelo de velocidades, las estaciones que registraron los eventos, la ubicación espacial de los planos a partir de los cuales se construyó el modelo de velocidades propuesto y la estructura de velocidades de cada plano.

La Figura 3.12 muestra tres perspectivas del modelo tridimensional de velocidades simplificado propuesto para la SMO, los incisos a, b, c y d muestran el límite inferior de las capas de velocidad 6.2 km/s, 6.6 km/s, 7.8 km/s y 8.0 km/s respectivamente. En la figura se observan únicamente las capas que son continuas a lo largo de la estructura.

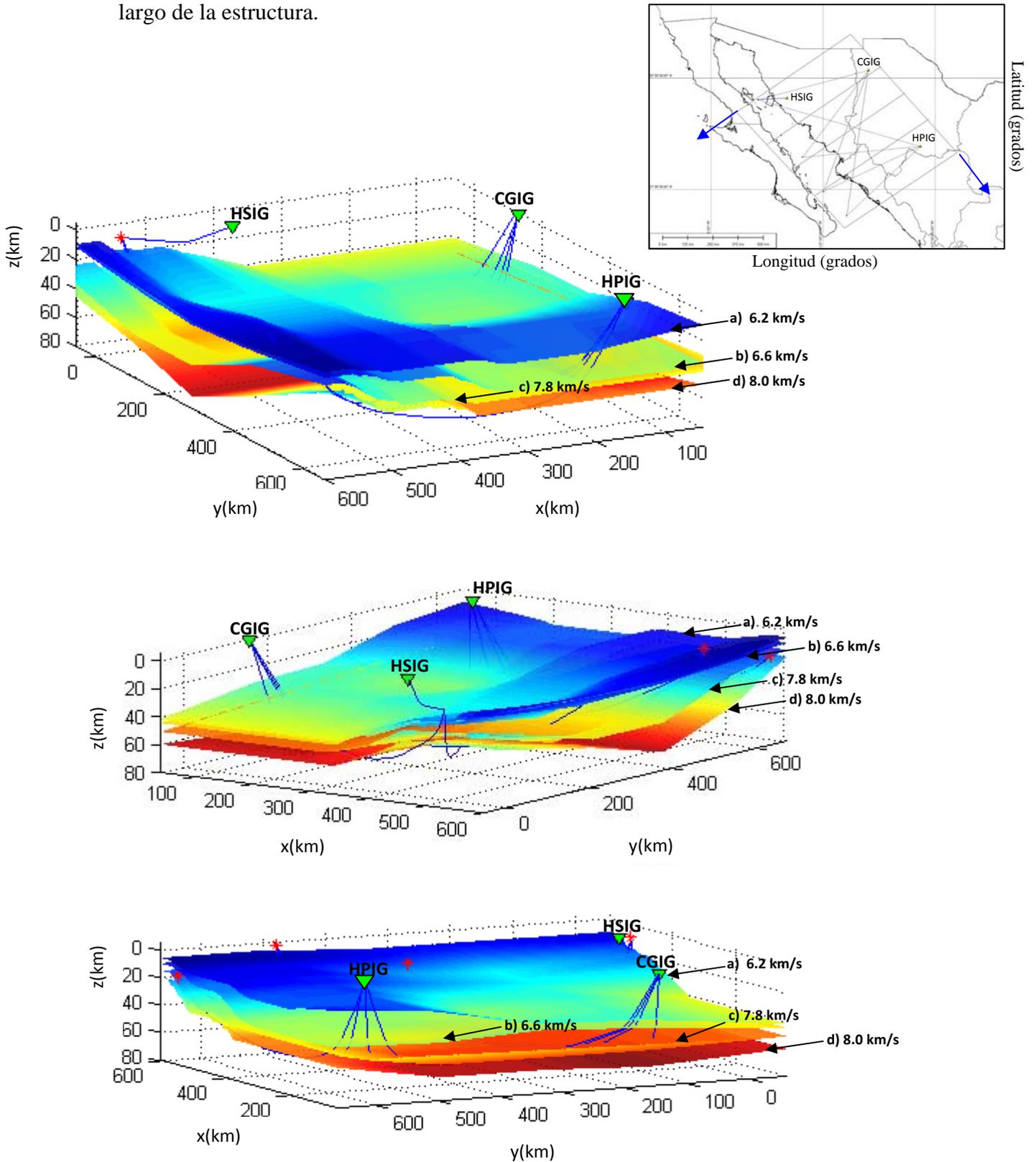


Figura 3.12. Modelo simplificado de la estructura de velocidades por debajo de la SMO. Las trayectorias seguidas por los rayos utilizados en la construcción del modelo de velocidades y una vista en planta del área de estudio. Los incisos a, b, c y d indican el límite inferior de las capas de velocidad 6.2 km/s, 6.6 km/s, 7.8 km/s y 8.0 km/s respectivamente. Las estaciones y los sismos utilizados en la construcción del modelo de velocidades de las ondas P también se observan.

La última capa, con velocidad de 8.2 km/s, comienza desde el límite inferior de la capa de 8.0 km/s y se extiende al menos hasta los 70 km de profundidad. El modelo de velocidades propuesto para la SMO es congruente con las teorías que proponen que, durante la deformación extensional terciaria, sus extremos oriental y occidental sufrieron un adelgazamiento importante debido a la fusión parcial del manto litosférico y/o de la corteza inferior, mientras que el adelgazamiento en su centro fue de menor magnitud; esta característica es el principal rasgo morfológico de la estructura y se hace más evidente en los perfiles 3, 4 y 5 que en los dos primeros (Figuras 3.6 – 3.10). El adelgazamiento se hace menos evidente en las capas más profundas.