

CAPITULO IV.

Discusión de resultados

IV.1 Introducción

El modelo de velocidades propuesto, después del análisis de trazado de rayos, es consistente los trabajos a los cuales se hizo alusión en los capítulos anteriores respecto de la estructura de velocidades por debajo de la SMO.

El tiempo total de viaje de un rayo sísmico es resultado de la suma de los tiempos parciales de viaje a través de las capas de velocidad diferente. Las capas de mayor espesor serán, en general, la que influyan en mayor medida en el cómputo final del tiempo de viaje.

IV.2 Resultados

Como se mencionó en el Capítulo segundo, un frente de onda está definido por superficies para las cuales $t = T(x) = \text{constante}$, en donde la función $T(x)$ es llamada *función de tiempo de viaje* a lo largo de trayectoria del rayo. Análogamente con los campos potenciales (potencial eléctrico, campo eléctrico, potencial gravitacional y aceleración debido a la gravedad), si se conoce la función de tiempo de viaje, $T(x)$, es posible construir líneas continuas perpendiculares a los frentes de onda en la dirección de la lentitud, llamados *trayectoria de rayos* (Chapman, 2004). La función $T(x)$ para cada registro sísmico se muestra en las figuras 4.1a, 4.2a, 4.3a y 4.4a, se observa el ajuste en el tiempo de viaje calculado con el programa Ray3D para la estructura de velocidades obtenida en este trabajo. En el caso de la Figura 4.1a la pendiente de las curvas es diferente debido a que las distancias epicentrales son muy diferentes en todos los casos, mientras que para distancias similares, las curvas tienen grandes semejanzas. La diferencia entre el tiempo de viaje teórico y el leído en los sismogramas para los registros del evento 4 de las estaciones CGIG, HPIG y HSIG son, -1.86 (s), 0.87 (s) y 0.17 (s) (Tabla 3.3), respectivamente. El signo negativo indica que el modelo de velocidades propuesto en este trabajo de tesis es más rápido que la estructura de velocidades real y una cantidad positiva es indicativo del caso contrario, el mismo análisis puede hacerse para cada registro. Las figuras 4.1b, 4.2b, 4.3b y 4.4b muestran el arribo de la fase P calculado con el programa Ray3D, en color negro, y el arribo leído en el sismograma, en color rojo.

En el caso de la figura 4.1b, es evidente que el mejor ajuste entre el tiempo teórico y el tiempo calculado, es el de la estación HSIG, esto podría deberse a que la estructura de velocidades a través de la cual viajó la onda es más simple para las estaciones más lejanas.

A pesar de que los cuatro sismos utilizados en el trazado de rayos son sismos someros, las trayectorias seguidas por las ondas son profundas debido a que la distancia entre el hipocentro y las estaciones en donde fueron grabados son del orden de cientos de kilómetros en la mayoría de los casos. Esta es la razón por la cual se desconoce la estructura cortical del macizo ígneo rocoso de la SMO, pues no existe el registro de las ondas propagándose en esa zona. Las figuras 4.1c, 4.2c, 4.3c y 4.4c son una vista lateral de los perfiles de velocidades descritos anteriormente, en las figuras también se observa una proyección lateral de los rayos sísmicos. En la figura 4.1c es evidente que la trayectoria más profunda recorrida por un rayo sísmico corresponde a la registrada en la estación más lejana.

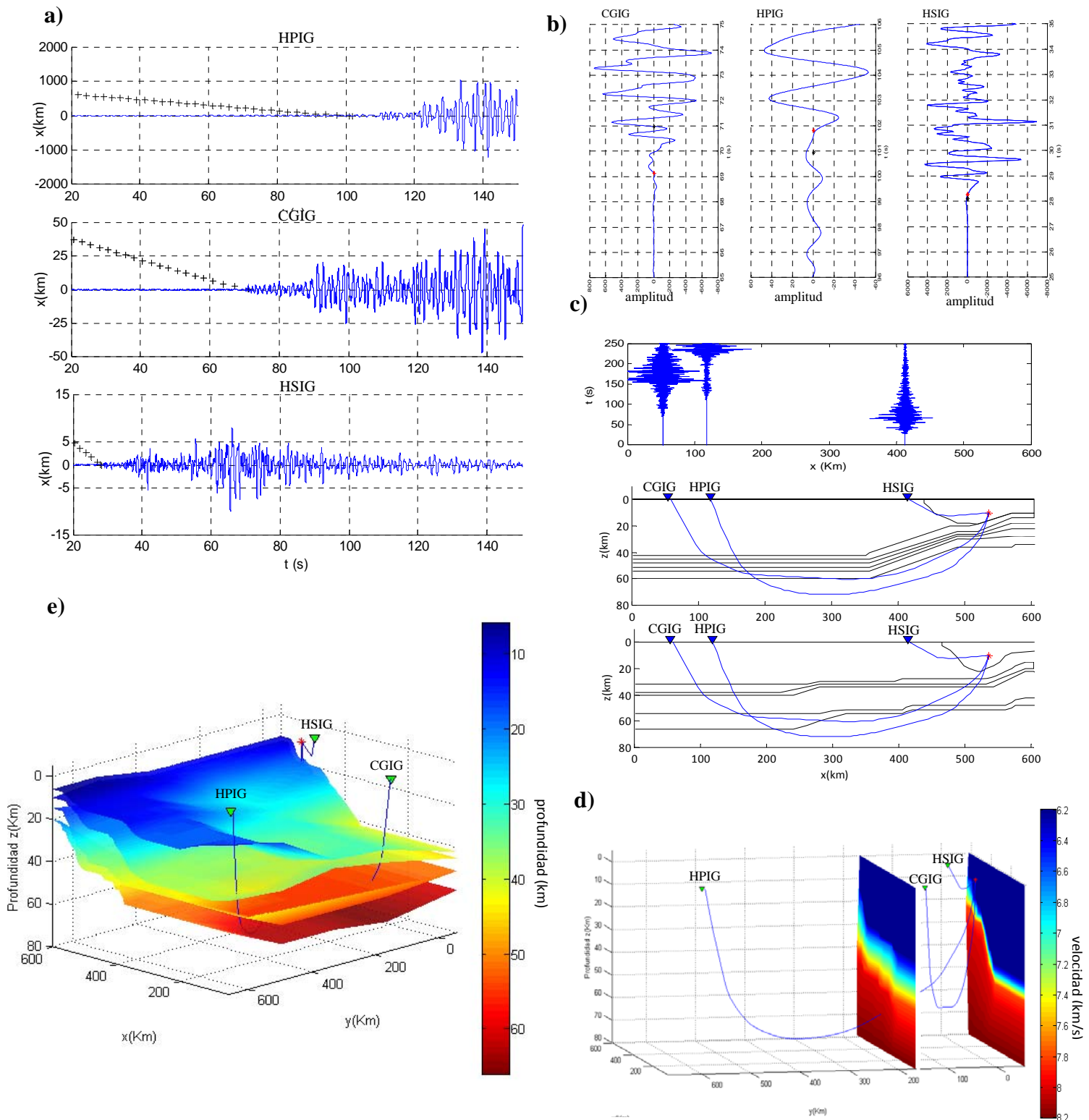


Figura 4.1. Evento 4 (03-Ago-09). a) Función $T(x)$, se muestra el ajuste del tiempo en la componente vertical de los registros sísmicos para diferentes valores de distancia. b) la ventana de 10(s) muestra el arribo leído en el registro (*) y el arribo calculado (*) con el modelo de velocidades. c) vista en perfil de las trayectorias seguidas por los rayos sísmicos correspondientes al evento 4 y que fueron detectados en las estaciones HSIG, HPIG, y CGIG; los planos que se muestran corresponden al modelo de velocidades propuesto para los perfiles 1 y 2. e) trayectorias seguidas por las ondas P cruzando las interfaces en modelo tridimensional de velocidades. d) distribución espacial de las estaciones que grabaron el evento, de las trayectorias seguidas por cada rayo y de los perfiles 1 y 2 de velocidades.

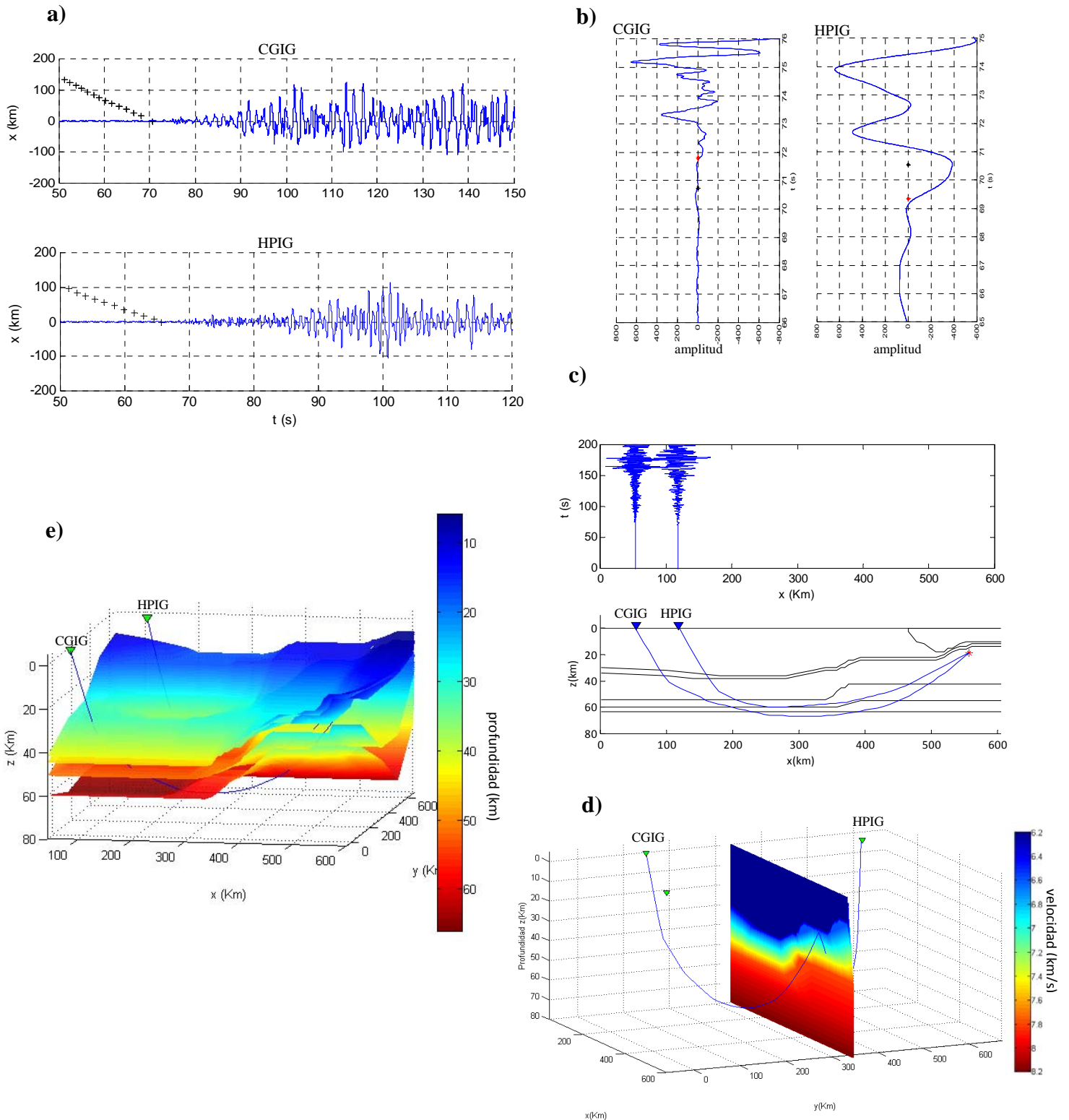


Figura 4.2. Evento 1 (13-Mar-07). a) Relación tiempo de arribo-distancia recorrida, se muestra el ajuste del tiempo en la componente vertical de los registros sísmicos para diferentes valores de distancia. b) la ventana de 10(s) muestra el arribo leído en el registro (*) y el arribo calculado (*) con el modelo de velocidades. c) vista en perfil de las trayectorias seguidas por los rayos sísmicos correspondientes al evento 1 y que fueron detectados en las estaciones CGIG y HPIG; el plano corresponde al modelo de velocidades propuesto para el perfil 3. e) trayectorias seguidas por las ondas P cruzando las interfaces en el modelo tridimensional de velocidades. d) distribución espacial de las estaciones CGIG y HPIG, de las trayectorias seguidas por los rayos que llegaron a estas y del perfil 3 de velocidades.

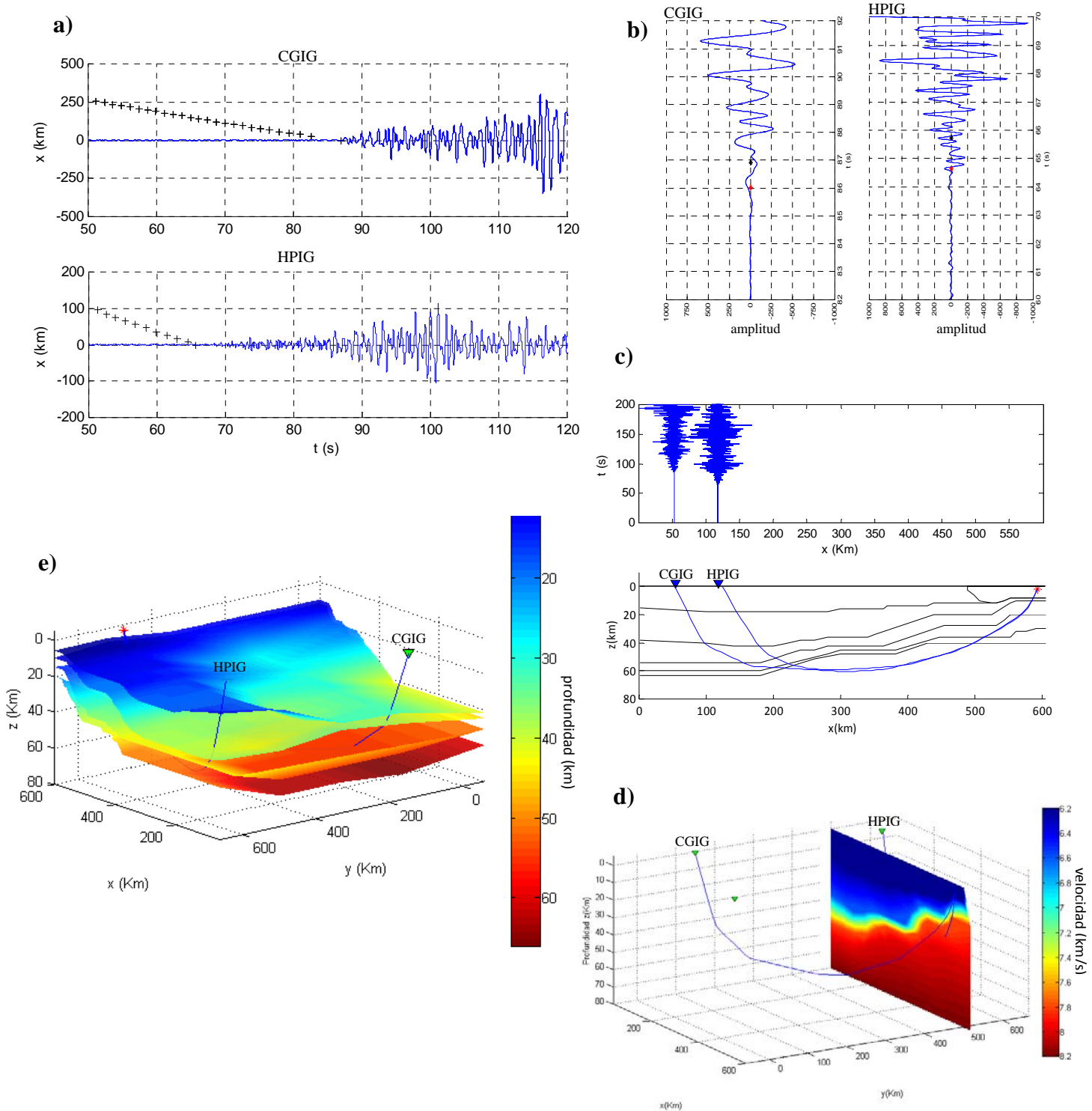


Figura 4.3. Evento 2 (01-Sep-07). a) Relación tiempo de arribo-distancia recorrida, se muestra el ajuste del tiempo en la componente vertical de los registros sísmicos para diferentes valores de distancia. b) la ventana de 10(s) muestra el arribo leído en el registro (*) y el arribo calculado (*) con el modelo de velocidades. c) vista en perfil de las trayectorias seguidas por los rayos sísmicos correspondientes al evento 2 y que fueron detectados en las estaciones CGIG y HPIG; el plano corresponde al modelo de velocidades propuesto para el perfil 4. e) trayectorias seguidas por las ondas P cruzando las interfaces en el modelo tridimensional de velocidades. d) distribución espacial de las estaciones CGIG y HPIG, de las trayectorias seguidas por los rayos que llegaron a estas y del perfil 4 de velocidades.

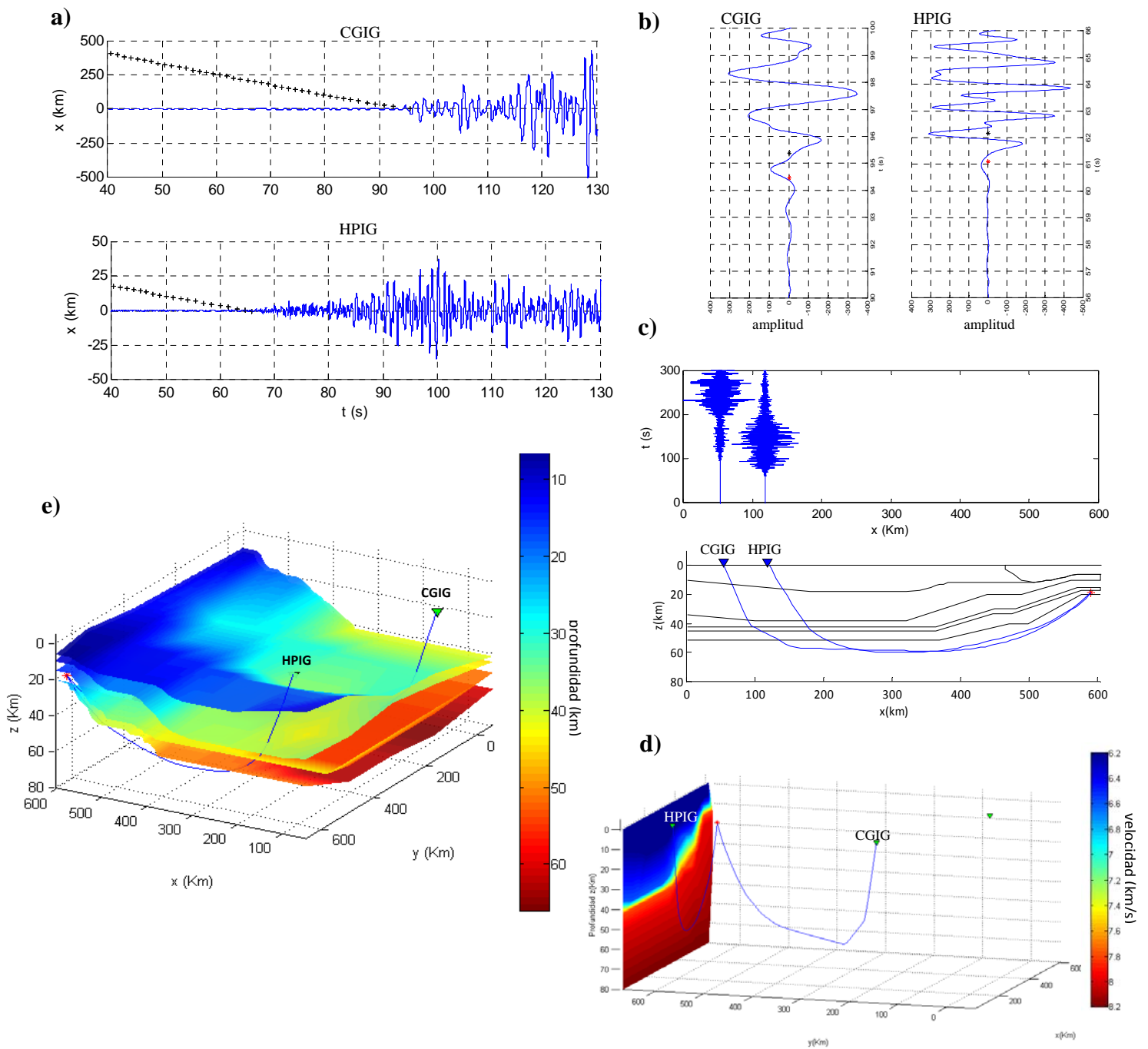


Figura 4.4. Evento 3 (05-Ene-09). a) Relación tiempo de arribo-distancia recorrida, se muestra el ajuste del tiempo en la componente vertical de los registros sísmicos para diferentes valores de distancia. b) la ventana de 10(s) muestra el arribo leído en el registro (*) y el arribo calculado (*) con el modelo de velocidades. c) vista en perfil de las trayectorias seguidas por los rayos sísmicos correspondientes al evento 3 y que fueron detectados en las estaciones CGIG y HPIG; el plano corresponde al modelo de velocidades propuesto para el perfil 5. e) trayectorias seguidas por las ondas P cruzando las interfaces en modelo tridimensional de velocidades. d) distribución espacial de las estaciones CGIG y HPIG, de las trayectorias seguidas por las ondas grabadas en las estaciones y del perfil 5 de velocidades.

Las figuras 4.1d, 4.2d, 4.3d y 4.4d muestran la ubicación espacial de los perfiles de velocidades descritos anteriormente, la escala de colores corresponde a los valores de velocidad de cada perfil. Se observa además la trayectoria de los rayos sísmicos atravesando el perfil de velocidades; es posible conocer la zona exacta que atraviesa la

onda sísmica. Finalmente, en las figuras 4.1e, 4.2e, 4.3e y 4.4e se observan las trayectorias seguidas por cada rayo sísmico dentro del modelo tridimensional de velocidades obtenido en este trabajo de tesis. Las figuras muestran, a grandes rasgos, el comportamiento de los rayos sísmicos al atravesar cada capa de la estructura de velocidades propuesta.

IV.3 Profundidades del Moho para la SMO

Para tener una idea general del subsuelo por debajo de la SMO se conjuntaron los estudios regionales existentes con los resultados obtenidos en este trabajo de tesis (Figura 4.5). En el mapa se presenta la profundidad del Moho, los números encerrados en un círculo representan los valores de profundidad propuestos por los autores recopilados en este trabajo y aquellos encerrados en un rectángulo son los valores de profundidad propuestos después del análisis de trazado de rayos.

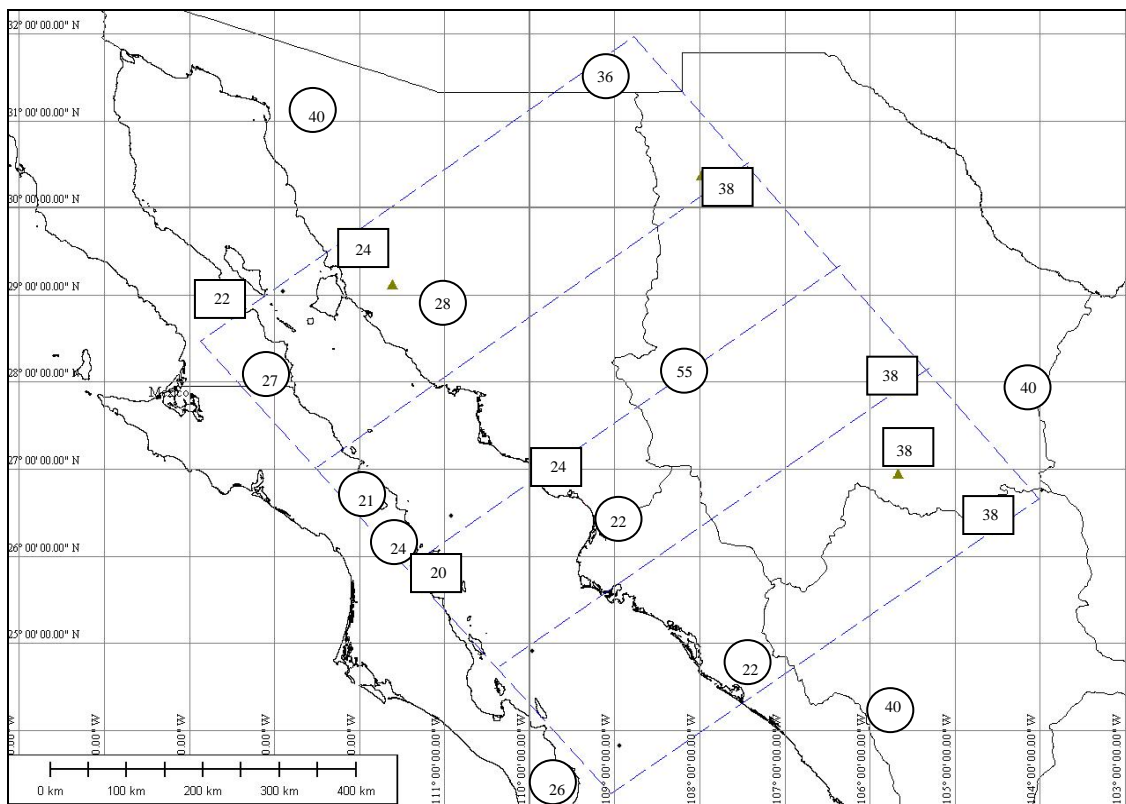


Figura 4.5. Profundidades del Moho en el nor-occidente de México. Los números dentro de los círculos son las profundidades propuestas por diversos autores que han estudiado la zona y los que están delimitados por un rectángulo son los espesores corticales que se proponen en este trabajo de tesis.

En esta vista en planta se observa el mismo patrón de deformación que se observó en los perfiles descritos en las Figuras 3.6 a 3.10, de adelgazamiento gradual de las capas, del núcleo de la SMO hacia los extremos.

IV.4. Interpretación

El cómputo final del tiempo de viaje es resultado de la suma de los tiempos parciales de viaje en cada capa de velocidad diferente, por lo que se puede esperar que las capas más gruesas tengan mayor influencia en el tiempo total de viaje.

La tabla 4.1 muestra una forma de cuantificar la sensibilidad del modelo propuesto

Tabla 4.1. Análisis estadístico del modelo propuesto

evento	estación	velocidad	distancia (Km)	tiempo parcial (s)	tiempo de viaje	% modelo
1 13-Mar-07	CGIG	6.20	46.95	7.57	70.73	10.76
		6.60	19.96	3.02		4.30
		7.80	109.99	14.10		20.04
		8.00	199.81	24.98		35.49
		8.20	169.81	20.71		29.42
	HPIG	6.20	44.53	7.18	70.53	10.17
		6.60	39.89	6.04		8.56
		7.80	149.92	19.22		27.21
		8.00	139.77	17.47		24.74
		8.20	169.83	20.71		29.32
2 01-Sep-07	CGIG	6.2	55.85	9.01	86.91	10.94
		6.6	9.90	1.50		1.82
		7.8	88.82	11.39		13.83
		8	386.30	48.29		58.64
		8.2	99.75	12.16		14.77
	HPIG	6.2	26.55	4.28	65.73	6.62
		6.6	49.89	7.56		11.70
		7.8	49.56	6.35		9.83
		8	89.89	11.24		17.38
		8.2	288.65	35.20		54.47
3 05-Ene-09	CGIG	6.20	48.80	7.87	95.38	8.29
		6.60	19.95	3.02		3.18
		7.80	90.08	11.55		12.16
		8.00	230.29	28.79		30.31
		8.20	358.62	43.73		46.05
	HPIG	6.20	13.64	2.20	62.17	3.55
		6.60	49.97	7.57		12.21
		7.80	19.93	2.55		4.12
		8.00	29.99	3.75		6.04
		8.20	376.70	45.94		74.08
4 03-Ago-09	CGIG	6.20	33.82	5.46	70.99	7.72
		6.60	30.03	4.55		6.44
		7.80	89.34	11.45		16.21
		8.00	169.96	21.24		30.07
		8.20	229.20	27.95		39.56
	HPIG	6.20	32.28	5.21	100.95	5.13
		6.60	49.75	7.54		7.43
		7.80	19.86	2.55		2.51
		8.00	49.32	6.16		6.08
		8.20	655.87	79.98		78.85
	HSIG	4.50	144.96	32.21	28.089	100.00

En la tabla se observan los tiempos total y parcial de viaje de los rayos sísmicos al cruzar el modelo de velocidades propuesto para la zona, esto permite hacer un análisis cuantitativo de la forma en que el espesor y la velocidad de las capas influyen en el cómputo del tiempo de viaje de las ondas sísmicas. Lo anterior cobra especial relevancia al utilizar el trazado de rayos, debido a que el espesor y la velocidad de las capas son las variables que se modifican sistemáticamente para lograr el mejor ajuste en el tiempo de viaje.

El conocimiento de la influencia que cada capa tiene en el cómputo final del tiempo de viaje facilita la metodología del trazado de rayos. Por ejemplo, en el evento 1, si se modificara en una centésima la velocidad de la capa de 6.6 km/s, el cambio en el tiempo final de viaje sería menor que si se modificara el espesor de la capa de 8.2 km/s la misma cantidad. Algunas capas no son significantes en el cómputo total de tiempo de viaje pero son necesarias para garantizar la propagación de una onda.

El modelo obtenido mediante el análisis de trazado de rayos, sugiere que la deformación afectó a los horizontes corticales de la misma forma en que lo hizo con los horizontes pertenecientes al manto y evidencia que la deformación sufrida por la estructura es mayor en la zona costera que en la provincia *Basin and Range*; esto podría ser consecuencia de la apertura del Golfo de California en el Mioceno.

La figura 4.10 permite hacer una interpretación cualitativa del modelo de velocidades propuesto. Si comparamos dicho modelo con el modelo geológico-tectónico propuesto, con base en la geología en superficie, por Ferrari *et. al.* (2002). Podríamos decir que la diferencia entre el modelo de velocidades propuesto para la corteza por debajo de Nuevo Casas Grandes, Chihuahua, y el propuesto por debajo de Hidalgo del Parral, Chihuahua, se debe a que el basamento está constituido por material de naturaleza litológica diferente, sin embargo la propuesta presentada en este trabajo no modela de esta forma a la estructura cortical.

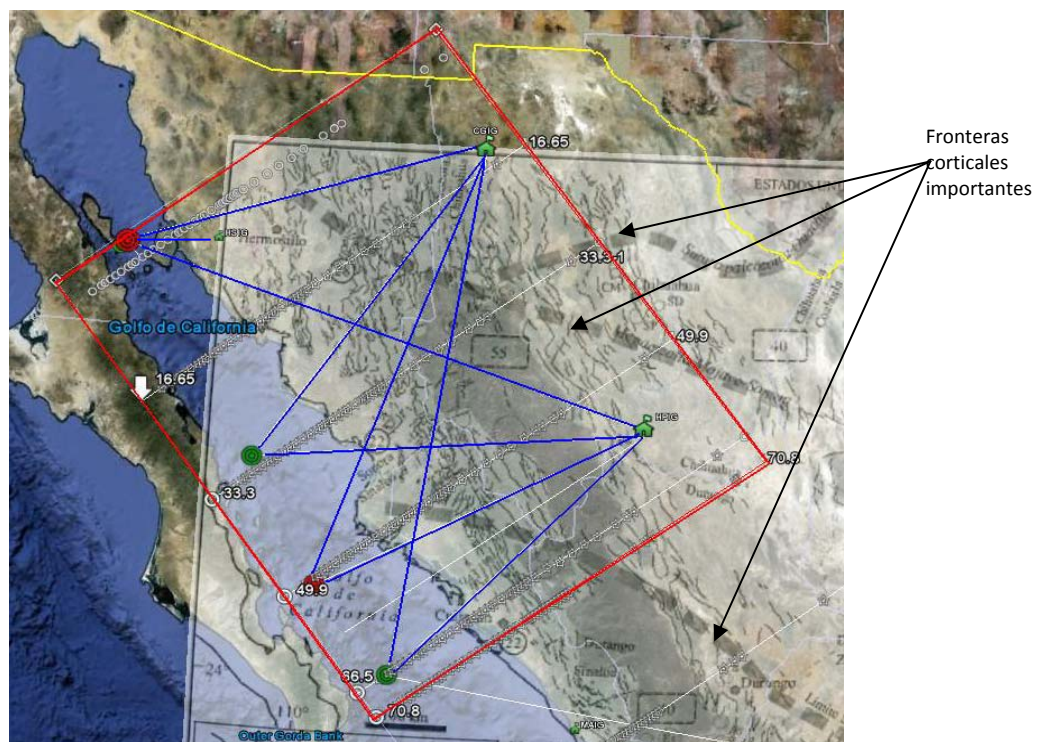


Figura 4.10. Una vista en planta del área de estudio, de las trayectorias seguidas por las ondas, de los sismos y de las estaciones que proporcionaron información. Se empalman dos figuras: el área de estudio y el modelo geológico documentado por Ferrari *et. al.* (2002). Las líneas discontinuas en color gris representan los límites corticales importantes.

El modelo propuesto por Ferrari *et. al.*(2002) podría explicar el hecho de que para dos trayectorias muy parecidas el modelo de velocidades propuesto sea, para una de ellas lento mientras que para la otra sea rápido, tal es el caso del registro de los eventos 1, 2 y 4 grabados en la estación CGIG (Figura 3.3).

En el modelo de velocidades presentado en este trabajo no se incluye una capa por debajo de la capa de 6.6 km/s con valor de 7.0 km/s, que por su delgadez no contribuye al cómputo final de tiempo de viaje pero que su existencia es necesaria para la propagación de las ondas a través del modelo. La velocidad de esta capa que subyace a la corteza en algunas regiones es similar a las velocidades de gabros en ofiolitas y corteza oceánica subducida (Salisbury y Christensen, 1978; Spudich y Orcutt, 1980, en Wolf y Levander, 1989), la velocidad de 7.0 km/s también es congruente con la velocidad que pueden tener rocas con alto grado de metamorfismo (Birch, 1960).

Un valor de velocidad de hasta 6.9 km/s es consistente con el valor de velocidades para la corteza inferior de naturaleza máfica (Brocher, 2005), el valor de 6.6 km/s también puede considerarse dentro de este rango.

Una velocidad de 7.97 km/s es un valor común en el manto superior (Oppenheimer y Eaton, 1984) por lo que se podría decir que las capas de 7.8 km/s y 8.0 km/s son capas pertenecientes a dicha zona.

En general, el modelo de velocidades obtenido responde al patrón general de velocidades para zonas de *rift* oceánicos y subducción de placas tectónicas.