

GEOMINAS

VOLUMEN 39, N° 54
ABRIL 2011



NÚCLEO BOLÍVAR

ISSN: 0016-7975.

Depósito Legal: pp 196403BO252

Registrada en: Latindex: Folio 15333; Revencyt: RVG003;
Fonacit: Reg2006000013; Periódica; GeoRef Titles; ICSU Navigator database: UDC: 624.131.1, 549;552.08

TERREMOTO DE CARIACO DEL 9 DE JULIO DE 1997: EVALUACIÓN DEL PARÁMETRO VP/VS

CARIACO EARTHQUAKE OF 1997, JULY 9TH: EVALUATION OF VP/VS PARAMETER

A. Montilla¹ R. Figueroa² R. M. Russo³

Recibido: 12-2-11; Aprobado: 17-3-11.

RESUMEN

Se evalúa la relación entre la velocidad de las ondas compresionales P y las ondas transversales S, Vp/Vs, para el área comprendida entre las coordenadas geográficas (10,394-10,628)°N y (63,922-63,143)°O, utilizando datos de eventos sísmicos secundarios asociados al terremoto de Cariaco del 9 de julio de 1997, y una muestra de otros sismos no asociados al terremoto ocurridos en esta misma área. Este parámetro Vp/Vs es usado conjuntamente con modelos de velocidades de capas planas paralelas y homogéneas para una corteza sólida en el cálculo rutinario de los parámetros hipocentrales de los eventos sísmicos que ocurren en una región determinada. El cálculo de estos parámetros se efectuó aplicando la técnica de Hatzfeld (Villaseñor, 1993). Se obtuvieron los valores Vp/Vs=1,719±0,005 y Vp/Vs=1,693±0,008, para los eventos sísmicos secundarios asociados al terremoto de Cariaco y para los otros sismos, respectivamente. Estos valores se encuentran dentro del rango reportado para otras regiones del mundo (1,65-1,80).

Palabras Clave: Corteza, eventos sísmicos secundarios, parámetros hipocentrales, terremoto, velocidades.

ABSTRACT

The Vp/Vs ratio is evaluated for the area located between the geographical coordinates (10,394-10,628)°N and (63,922-63,143)°O, using secondary seismic events (aftershocks) data associated to the earthquake of Cariaco (July 1997), and a sample of other earthquakes not associated to the former, which happened in this same area. This Vp/Vs parameter is used together with speeds models of parallel and homogeneous plane layers for a solid crust in the routinary calculation of the hypocentral parameters of the seismic events which occur in a certain region. The evaluation of this parameter was made by the technique of Hatzfeld (Villaseñor, 1993). The obtained values Vp/Vs were 1,719±0,005 and 1,693±0,008, for the aftershocks, and for the other earthquakes, respectively. These values are inside the reported range for other regions of the world (1,65-1,80).

Key Words: Aftershocks, crust, earthquake, hypocentral parameters, velocities.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se evalúa la relación Vp/Vs para el área comprendida entre las coordenadas geográficas (10,394-10,628)°N y (63,922-63,143)°O, donde Vp es la velocidad de las ondas P y Vs la velocidad de las ondas S, utilizando eventos sísmicos secundarios asociados al terremoto de Cariaco del 9 de julio de 1997, el mayor evento sísmico de Venezuela en los últimos años. Este valor es un parámetro sísmico de particular importancia debido a dos razones principales: 1) está aceptado como un elemento clave en el diseño de modelos de cortezas regionales; 2) algunos han señalado que la serie de tiempo vinculada a este valor, puede, en ciertos casos, ser considerada como elemento predictor de terremotos. Esta posibilidad ha sido objeto de bastante discusión. Hayakawa en 1950, y Kondratenko y Neresov en 1962, observaron que la velocidad de las ondas sísmicas puede variar con el tiempo, y Semenov, en 1969, mostró una disminución en la velocidad de las ondas P antes de sismos de magnitud moderada en la región de Garm, en la antigua U. R. S. S. (B. Howell, 1990). Aggarwal *et al.*,

en 1973, Ohtake en 1973 y Whitcomb *et al.*, también en 1973, obtuvieron resultados similares (Howell, 1990). Confirmaciones adicionales consiguen Wyss y Johnston en 1974, Robinson *et al.*, en 1974 y nuevamente Wyss en 1975. Al mismo tiempo, McEvelly y Johnson en 1973 reportan también casos donde el fenómeno no se verificó, al igual Allen y Helmberger, 1973; Cramer y Kovach, 1974; Boore *et al.*, en 1975 y Kanamori y Fuis en 1976.

El área de estudio se encuentra dentro de la región nororiental de Venezuela, región de especial interés desde el punto de vista tectónico, ya que se encuentra en la zona de interacción de las placas tectónicas del Caribe y de Suramérica (figura 1). De la comúnmente aceptada subducción de las Antillas Menores se pasa a un menos evidente movimiento transcurrente dextral de dirección E-O en el norte

¹Físico, MSc. Centro de Sismología, Universidad de Oriente (UDO), Venezuela., e-mail: amontilla@sucre.udo.edu.ve

²Lcdo°Mat°. Centro de Sismología, UDO, Venezuela. e-mail: rfig508@yahoo.es

³Geofísico, PhD. Department of Geological Sciences, University of Florida. e-mail: rrusso@ufl.edu

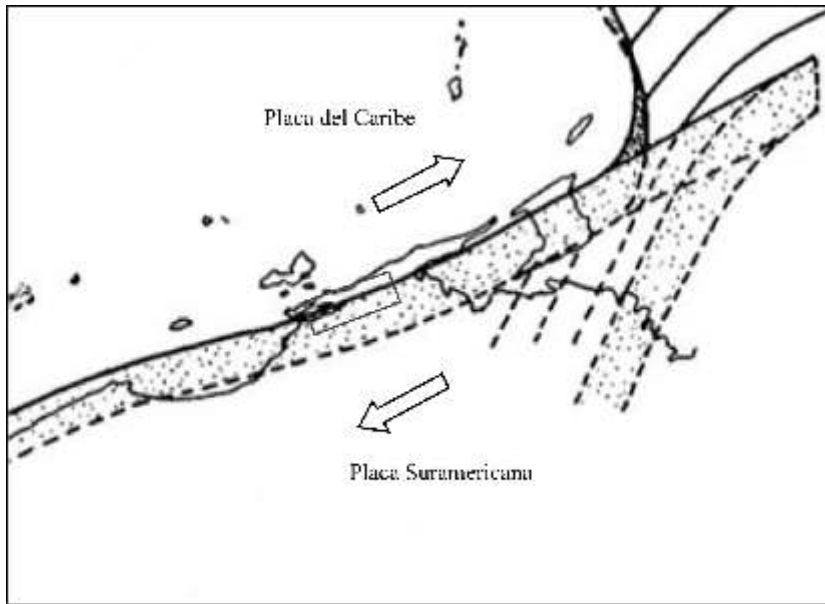


Figura 1. Representación esquemática de la interacción de las placas tectónicas del Caribe y Suramericana, las flechas indican el movimiento relativo entre ambas. El rectángulo representa el área donde se realizó el estudio.

de Venezuela (Villaseñor *et al.*, 1992). La zona de contacto entre ambas placas es compleja y produce una extensa área de deformación, caracterizada por varios sistemas de fallas; entre las principales se encuentran: la falla de El Pilar, la falla de Urica, la falla de San Francisco, la falla de El Soldado y la falla de Los Bajos (figura 2). De éstas la falla de El Pilar es transcurrente dextral de dirección E-O y ha sido interpretada como parte del límite entre las

placas del Caribe y Sudamérica (Molnar y Sykes, 1969; Schurbert, 1982; Soulas, 1985). La actividad sísmica a lo largo de dicha falla es moderada, distribuyéndose principalmente en dos agrupamientos, uno alrededor de la población de El Pilar, y otra alrededor de la población de Cariaco (Villaseñor *et al.*, 1992). Se observa en las cercanías de la falla de El Pilar dos importantes núcleos de sismicidad al norte y al sur de la península de Paria.

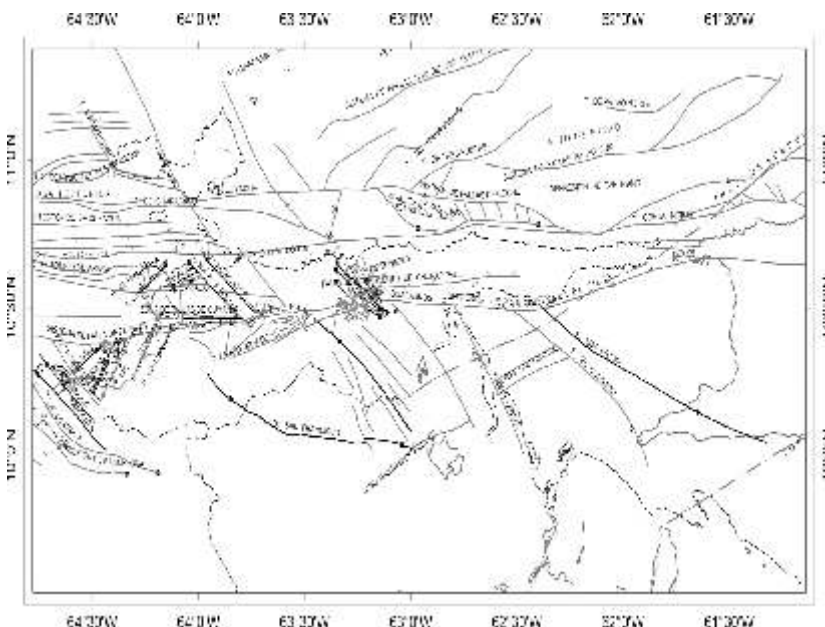


Figura 2. Fallas principales de la región nororiental de Venezuela.

TEORÍA Y METODOS

Los parámetros hipocentrales de los terremotos que ocurren en una región, se determinan en la mayoría de los casos a partir de un modelo de velocidades de ondas sísmicas a través de una corteza terrestre estructurada en capas planas paralelas, donde se asume que la razón de Poisson es constante (Lee y Stewart, 1981). Bajo estas suposiciones las ondas compresionales P, y las ondas transversales o de corte S, viajan por la misma trayectoria, pero a distintas velocidades, desde la fuente sísmica hasta un punto de observación dado. En otras palabras, $V_p/V_s = c$, donde c es constante a lo largo de la trayectoria. Valores altos de V_p/V_s corresponden a profundidades focales menores. Generalmente se acepta que la banda de valores V_p/V_s razonables a escala regional está entre 1,65 y 1,80 (Villaseñor, 1993), cuyo promedio para otras regiones del mundo es cercano a 1,73.

Entre los valores de V_p/V_s calculados con anterioridad para la región oriental se encuentran el que se deduce del modelo de velocidades presentado por Pérez y Aggarwal en 1981 ($V_p/V_s = 1,80$), el de Ramos y Mendoza en 1991 ($V_p/V_s = 1,75$ 0,02) y el de Montilla *et al.*, en el año 2001 ($V_p/V_s = 1,76$ 0,01).

Existen numerosos métodos para determinar la relación V_p/V_s , entre los cuales nosotros mencionaremos el método del Diagrama de Wadati y la técnica descrita por Hatzfeld. El diagrama de Wadati (1933), usado originalmente para determinar el tiempo origen (T_0) de un evento sísmico, se ha utilizado ampliamente en el cálculo de algunos parámetros de localización hipocentral. En años recientes, algunos autores han reportado su uso en la evaluación de la razón V_p/V_s , entre ellos Hales *et al.* (1981) y Toth y Kisslinger (1984). Para un terremoto dado, y para cada estación, se dibujan las diferencias entre los tiempos de llegada de las ondas P y S ($T_s - T_p$) frente a los tiempos de llegada de las ondas P (T_p). Estos puntos definen una recta cuya

pendiente es igual a V_p/V_s-1 . Para aumentar el número de datos y reducir la incertidumbre en el valor del cociente, se utiliza la técnica descrita en Hatzfeld *et al.* (1993): "dado un terremoto, para cada par de estaciones (i, j) se trazan las diferencias entre los tiempos de llegada $T_{s_j}-T_{s_i}$ frente a los correspondientes $T_{p_j}-T_{p_i}$. Los puntos ($T_{p_j}-T_{p_i}$, $T_{s_j}-T_{s_i}$) determinan una recta que pasa por el origen, y permite superponer datos de varios terremotos en el mismo gráfico. La pendiente de esta recta es igual al cociente de velocidades V_p/V_s ".

La obtención de los datos provenientes de los eventos sísmicos secundarios asociados al terremoto de Cariaco se realizó mediante la instalación de 9 estaciones sísmológicas portátiles (7 sismómetros de 3 componentes, marca Mark Products, y 2 sismómetros banda ancha de 3 componentes, marca Streickeisen, STS-2) de la Northwestern University, e IRIS, U.S.A., en el estado Sucre, Venezuela, por medio de un convenio de cooperación internacional, conjuntamente con la Red de estaciones sísmológicas del Centro de Sismología de la Universidad de Oriente (ReSUDO), Venezuela (5 estaciones permanentes telemétricas con sismómetros de corto período, marca Teledyne, S-13, y 3 estaciones portátiles con sismómetros de corto período, marca Kinometrics, Ranger SS-1). Estos conjuntos de estaciones sísmológicas formaron la red sísmológica Northwestern University -Universidad de Oriente (NWU-UDO), operativa desde el 18 de julio hasta el 11 de agosto de 1997. En la tabla I se muestra la ubicación de dichas estaciones, distribuidas en la región nororiental de Venezuela. Actualmente continúa operativa la red del Centro de Sismología con 9 estaciones sísmológicas telemétricas. La selección de las fases P y S se efectuó con los programas Seismic Analisis code (Goldstein *et al.*, 1996) y Playback (Beckles *et al.*, 1990).

De un total de 140 eventos sísmicos secundarios registrados por la red NWU-UDO, se seleccionaron 73 eventos dentro del área de estudio que ofrecieron, al hacerles el diagrama de Wadati, un coeficiente de correlación mayor o igual que 0,95 (figura 3). Similar procedimiento de selección se aplicó a una muestra de 123 eventos no asociados al terremoto de Cariaco (datos recolectados por ReSUDO, tabla II), de los cuales solo 41 cumplieron con el criterio establecido (figura 4). A ambos grupos de eventos se les aplicó la técnica de Hatzfeld para determinar V_p/V_s .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El valor calculado para los eventos sísmicos asociados al terremoto de Cariaco es $V_p/V_s = 1,719 \pm 0,005$, con una profundidad promedio para los eventos considerados de 10,320 km., mientras que el valor obtenido utilizando los eventos no asociados al terremoto es $V_p/V_s = 1,693 \pm 0,008$, cuya profundidad promedio es de 6,053 km, (figuras 5). Estos valores se encuentran entre la banda de valores V_p/V_s aceptada a escala regional, la cual se ubica entre 1,65 y 1,80 (Villaseñor, 1993), cuyo promedio se

Tabla I. Red de estaciones sísmológicas NWU-UDO.

ESTACIÓN	COD.	LAT. (°)	LON. (°)	TIPO
Barcelona	BARV	10.658	-63.169	P
Caimancito	CMCV	10.627	-63.894	P
Cerro Pacholi	CPCV	10.626	-62.762	P
Cariaco	CRCV	10.498	-63.552	P
Cerro Zelaya	CZLV	10.641	-63.694	P
Guaricuco	GCCV	10.587	-63.421	P
Las Malvinas	LMVV	10.217	-63.188	P
Muelle de Cariaco	MDCV	10.474	-63.661	P
San Antonio Del Golfo	SAGV	10.440	-63.794	P
Cumaná	CUMV	10.429	-64.194	T
Manicuare	MANV	10.561	-64.189	T
Cumanacoa	COAV	10.158	-63.827	T
Campeare	CAMV	10.551	-63.322	T
Caripito	CARU	10.119	-63.113	T
Sabana de Brito	SBSV	10.443	-63.600	P
Campearito	CAMP	10.373	-63.420	P
Chiguana	CHIG	10.499	-63.674	p

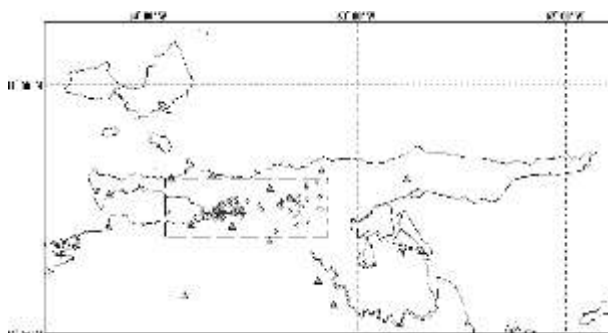


Figura 3. Ubicación epicentral de los 73 eventos asociados al terremoto de Cariaco (círculos) en el área de estudio y la distribución espacial de la red sísmométrica Northwestern University - Universidad de Oriente (triángulos).

Tabla II. Red de estaciones sísmológicas ReSUDO.

ESTACIÓN	COD.	LAT. (°)	LON. (°)	TIPO
Cumaná	CUMV	10.427	-64.198	T
Manicuare	MANV	10.561	-64.189	T
Cumanacoa	COAV	10.158	-63.827	T
Campeare	CAMV	10.551	-63.322	T
Caripito	CARU	10.118	-63.112	T
Catuaño Arriba	CATA	10.601	-63.070	T
Manacal de Irapa	MANA	10.673	-63.652	T
Palma Real	PUDO	11.013	-63.881	T
Los Altos de Santa Fe	SAFE	10.207	-64.440	T

ubica alrededor de los 1,73. Los valores determinados presentan poca diferencia con los obtenidos por Ramos y Mendoza (1991), y Montilla *et al.* (2001) para la región nororiental de Venezuela.

CONCLUSIONES

Los valores determinados son consistentes con los reportados para otras regiones del mundo y difieren en centésimas de los obtenidos por Ramos y Mendoza (1991), y Montilla *et al.* (2001) para la región nororiental de Venezuela. Debe tenerse en cuenta que nuestra área de estudio tiene una extensión

menor que la considerada por esos autores.

A diferencia de lo reportado por Villaseñor (1993), el promedio de profundidad focal mayor corresponde al mayor valor de V_p/V_s calculado. Consideramos que uno de los factores que puede estar influyendo en ésto, son las distintas configuraciones de red empleadas para registrar ambos grupos de eventos.

Nótese que el arreglo sismométrico NWU-UDO, que proporcionó las lecturas asociadas a los 73 eventos sísmicos secundarios asociados al terremoto de Cariaco aquí consideradas, envuelve completamente el área de estudio (figura 3).

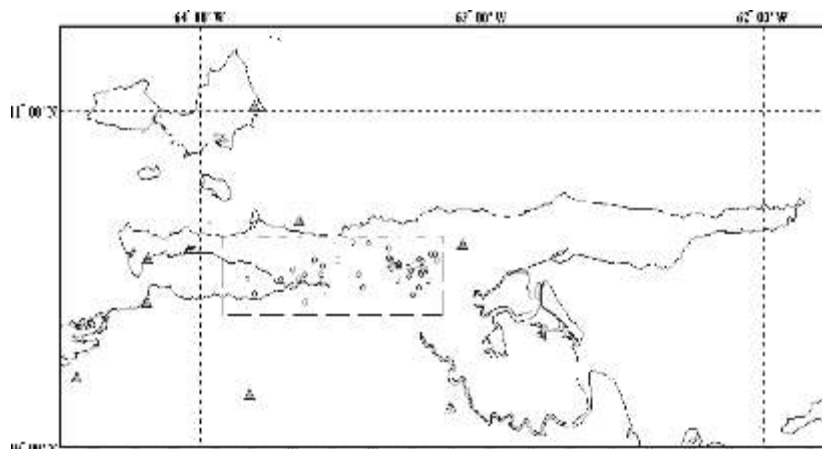


Figura 4. Ubicación epicentral de los 41 eventos no asociados al terremoto de Cariaco (círculos) en el área de estudio y la distribución espacial de la actual red sismométrica de la Universidad de Oriente (triángulos).

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al profesor Luis D. Beuperthuy por su asesoría y posterior revisión del manuscrito; a Jhonny González (Analista de CSUDO) y Claudio Marchan (Encargado del área de SIG) por su valiosa colaboración en el diseño de los mapas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aggarwal, Y. P., Sykes L. R., Arbruster J., and Sbar M. L. (1973). Premonitory changes in seismic velocities and prediction of earthquake, *Nature* 241, 101-104.
- Allen, C. R., and Helmberger D. V. (1973). Search for temporal changer in seismic velocities using large explosions in southern California, in *Proc. Conf. Tectonic Problems San Andreas Fault System*, R. B. Kovack and A. Nur, Editors, June 20-23, 1973, Stanford, Calif., 436-445.
- Beckles, D., Shepherd, J., Aspinall, W., and Lynch L.L. (1990). *A family of programmes for collection and processing of seismograph data. Program description and operators manual*. 59 pp.
- Boore, D. M., Lindh, A. G., McEvelly, T. V., and Tolmachoff, W. N. (1975). A search for travel-time changes associated with the Parkfield, California earthquake of 1966, *Bull. Seism. Soc. Am.* 65, 1407-1418.
- Cramer, C. H., and Kovach, R. L. (1974). A search for teleseismic travel-time anomalies along the San Andreas Fault zone, *Geophys. Res Lett.* 1, 90-92
- Goldstein, P., Minner, L., Tapley, W.C., and Tull, J.E. (1996). Seismic Analysis Code (SAC). Lawrence Livermore National Laboratory, 563 pp.
- Hales, A. L., K. J. Muirhead, and L. Maki-Lopez (1981). The times of origin and depths of focus of intermediate and deep focus earthquakes: model calculations. *Bull. Seism. Soc. Am.* 71, 1539-1552.
- Hatzfeld, D., V. Caillot, T. E. Cherkaoui, H. Jebli, and F. Medina (1993). Microearthquake seismicity and fault plane solutions around the Nékor strike-slip fault, Morocco. *Earth and Planetary Science Letters*, 120, 31-41.
- Hayakawa, M. (1950). The variation of the seismic wave velocity, *Rept. Geol. Surv. Japan*, Spec. Number, 7-24.
- Howell Jr., B. F. (1990). An Introduction to Seismological Research. *Cambridge University Press*.
- Kanamori, H. and G. Fuis (1976). Variation of P-wave velocity before and after the Galway Lake earthquake ($M_L = 5.2$) and the Goat Mountain Earthquake ($M_L = 4.7$), 1975, in the Mojave Desert, California. *Bull. Seism. Soc. Am.* 66: 2017-2037.
- Kondratenko, A. M., and Nersesov I. L. (1962). Some result of the study on changes in the velocity of longitudinal and transverse waves in a focal zone, *Phys. Earthquake Explosion Seism.*, USSR, 198-234.
- Lee, W. H. K., and Stewart, S. W. (1981). *Principles and Applications of Microearthquake Networks*. Academic Press, Inc. London, pp. 129-138.
- McEvelly, T. V., and Johnson L. R. (1973). Earthquake of strike-slip type in Central California: Evidence on the question of dilatancy, *Science*, 182, 581-583.
- Molnar, P., and Sykes L. R. (1969). Tectonics of the Caribbean an Middle America regions from focal mechanisms and seismicity, *Geol. Soc. Amer. Bull.* 80, 1629-1684.
- Montilla, A., Ramos, C., y Rojas, J. (2001). Relación V_p/V_s para la región nororiental de Venezuela comprendida entre las coordenadas 9.5–11.5°N y 61.5–65.5°O. *SABER*, Vol 13, N° 2, 119-122.

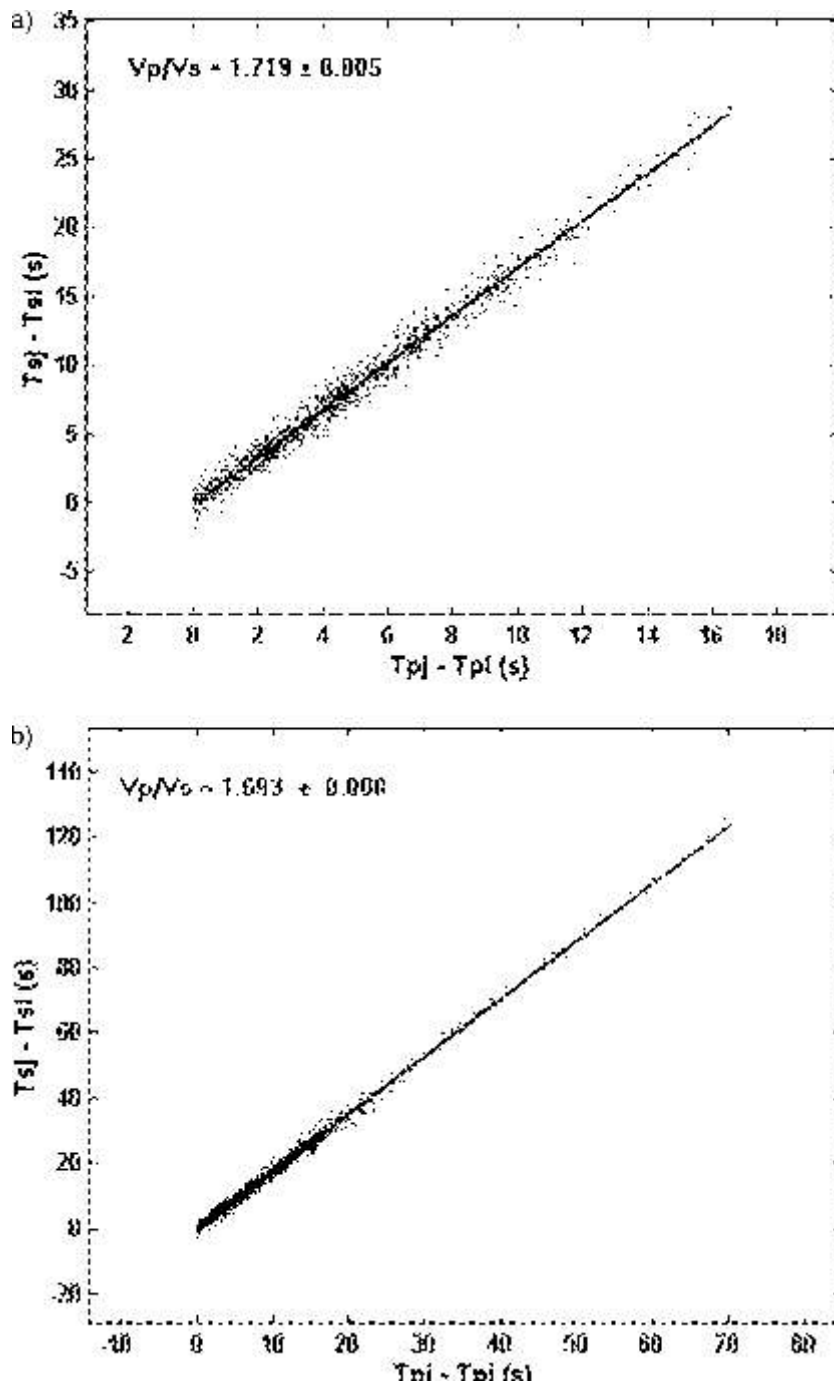


Figura 5. Diagramas de Hatzfeld. a) Los eventos sísmicos secundarios asociados al terremoto de Cariaco, b) Los eventos no asociados al terremoto de Cariaco.

- Ohtake, M. (1973). Changes in the V_p/V_s ratio related with the occurrence of the shallow earthquake in Japan, *J. Phys. Earth (Tokyo)* 21, 173-184.
- Peréz, O. And Aggarwal, Y. (1981). Present-Day Tectonics of the Southeastern Caribbean and Northeastern Venezuela. *Journal of Geophysical Research*. 86 (B11), 10791-10804.
- Ramos, C. y Mendoza, J. (1991). *Relación V_p/V_s para Venezuela y Zonas Adyacentes*. FUNVISIS.
- Robinson, R., Wesson, R. L., and Ellsworth, W. L. (1974). Variation of P-wave velocity before the Bear valley, California, earthquake of 24 February 1972, *Science* 184, 1281-1283.
- Schubert, C. (1982). Origin of Cariaco Basin, Southern Caribbean Sea, *Marine Geology* 47, 345-360.
- Semenov, A. M. (1969). Variations in the travel-time of transverse and longitudinal waves before violent earthquake, *Izv. Earth Phys. (English Transl.)* 4. 245-248.
- Soulas, J. P. (1986). Neotectónica y tectónica activa en Venezuela y regiones vecinas, *VI Cong. Geol. Venez.* Tomo X, 6639-6656.
- Toth, T. and C. Kisslinger (1984). Revised focal depths and velocity models for local earthquakes in the Adak seismic zone. *Bull. Seism. Soc. Am.* 74, 1349-1360.
- Villaseñor, A., Muñoz, M. I., Franke, M. y Gajardo, E. (1992). Estudios de microsismicidad en el norte de Venezuela. *Zona Nororiental. VI Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, 16 al 20 de Agosto de 1992.*
- Villaseñor, A. (1993). *Sismicidad y Tectónica en el Límite de Placas del Caribe: Norte de Venezuela e Hispaniola*. Tesis de Grado para optar al título de Doctor en Ciencias Físicas. Universitat de Barcelona, Departament de Geologia Dinàmica, Geofísica i Paleontologia, pp. 39-40.
- Wadati, K. (1933). On the travel time of the earthquake waves, II. *Geophys. Mag.* 7, 101 - 111.
- Whitcomb, J. H., Garmany J. D., and Anderson, D. L. (1973). Earthquake prediction: Variation of seismic velocities before the San Fernando earthquake, *Science* 180, 632-635.
- Wyss, M. (1975). Precursors to the Garm earthquake of the March 1969, *J. Geophys. Res.* 80, 2926-2930.
- Wyss, M., and Johnston (1974). A search for teleseismic P residual changes before large earthquakes in New Zealand, *J. Geophys. Res.* 79, 3283.