

Análisis de tres sismos interplaca tipo thrust registrados en: Chile 2010, Perú 2007 y Ecuador 1998

Roberto Aguiar Falconí¹

Resumen

Se analizan tres sismos interplaca tipo thrust, registrados el: 27 de febrero de 2010 en Chile que tuvo una magnitud $M_w = 8.8$; 15 de agosto de 2007 en Perú con una magnitud $M_w = 7.9$ y el 4 de agosto de 1998 en Ecuador con magnitud $M_s = 7.1$. Cinco son los puntos que se analizan en este artículo y son los siguientes: el tiempo de duración; la forma de los acelerogramas y de los espectros de respuesta elásticos; la intensidad de Arias y la relación entre las isosistas con la longitud de ruptura.

Palabras claves: Isosistas. Interplaca tipo thrust. Longitud de ruptura.

¹ Prof. Dr. Ing. Escuela Politécnica del Ejército, Centro de Investigaciones Científicas, Av El Progreso S/N, Valle de los Chillos, Ecuador. E-mail: raguiar@espe.edu.ec.

1 Introducción

El mega sismo de Chile del 27 de febrero de 2010, ocurrió a las 03:34 hora local y tuvo una magnitud $M_w = 8.8$, siendo el mayor sismo registrado instrumentalmente en el mundo (Kanamori, 2010). El hipocentro o lugar donde se inicia la ruptura está ubicado en las coordenadas geográficas: $36^{\circ}17'23''$ S., y $73^{\circ}14'20''$ W, a una profundidad de 30.1 km (BARRIENTOS, 2010).

El sismo de Perú del 15 de agosto de 2007, se registró a las 18:40 hora local, tuvo una magnitud $M_w = 7.9$ constituyéndose en el mayor sismo registrado en los últimos 292 años en la región; las coordenadas del hipocentro son: 13.49° S., y 76.85° W, la profundidad focal es de 26 km. (TAVERA et al.2008, p. 1).

El último sismo registrado en el Ecuador y que causó gran daño en las estructuras fue el de Bahía de Caráquez, el 4 de agosto de 1998, que tuvo una magnitud $M_w = 7.1$; las coordenadas del hipocentro son: 0.55° S., y 80.53° W., a una profundidad focal de 39 km. (AGUIAR et al.1998).

Por la ubicación del foco, con relación a la fosa y la profundidad focal, de los tres sismos mencionados (de 20 a 40 km.) se concluye que se trata de sismos interplaca tipo thrust. En la figura 1 se presenta un esquema de este tipo de sismos.

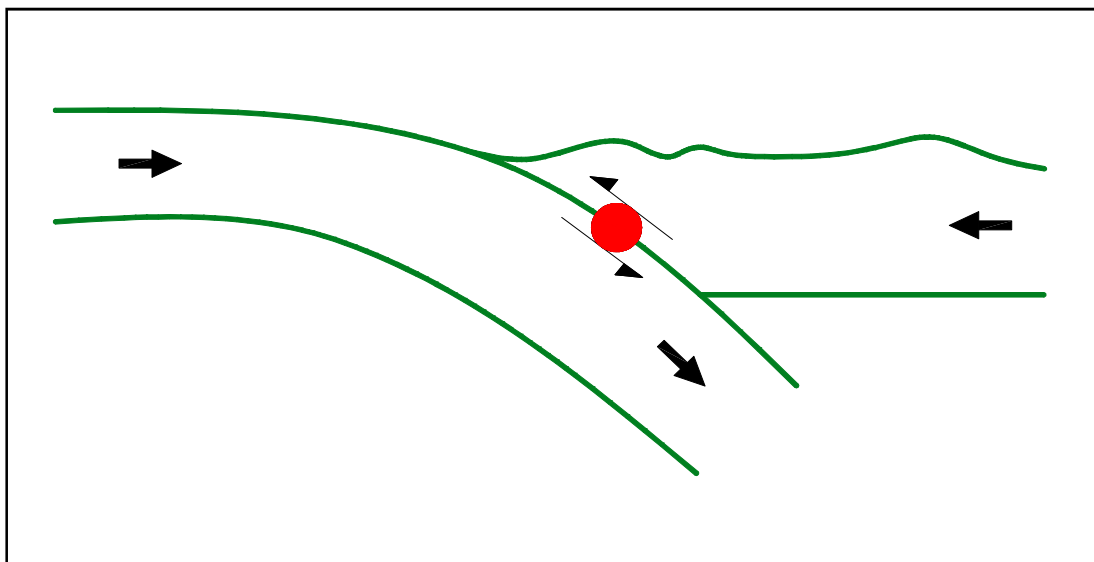


Figura 1:Esquema de un sismo interplaca tipo thrust.

2 Duración de los sismos

La respuesta sísmica de una estructura es función del tiempo de duración del sismo, por este motivo en este apartado se indican dichos tiempos para los sismos en estudio.

El sismo de Chile tuvo una duración de 140 seg., con una fase intensa de que varía de 40 a 50 seg., como se observa en la figura 2, que corresponde a un registro en Santiago, en la Universidad de Chile, en suelo tipo II de acuerdo a la normativa de Chile de 1996. Se aprecia que los tres registros tienen valores similares de tal manera que la componente vertical tuvo valores parecidos a la componente horizontal en suelos tipo II, en suelos tipo III no sucedió esto en Santiago de Chile.

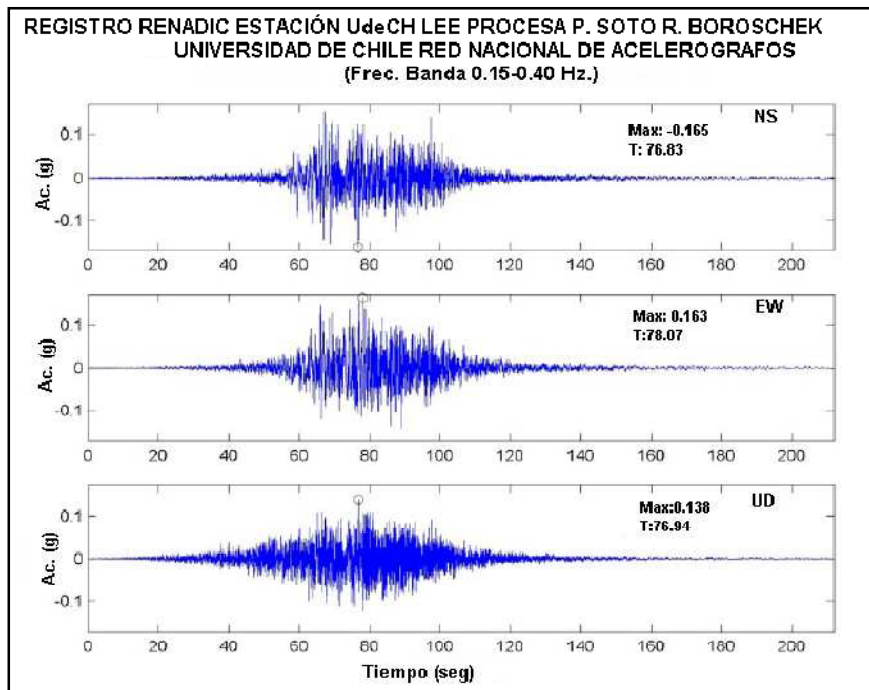


Figura 2: Registro de Aceleraciones en U. de Chile. Boroschek et al. (2010, 1).

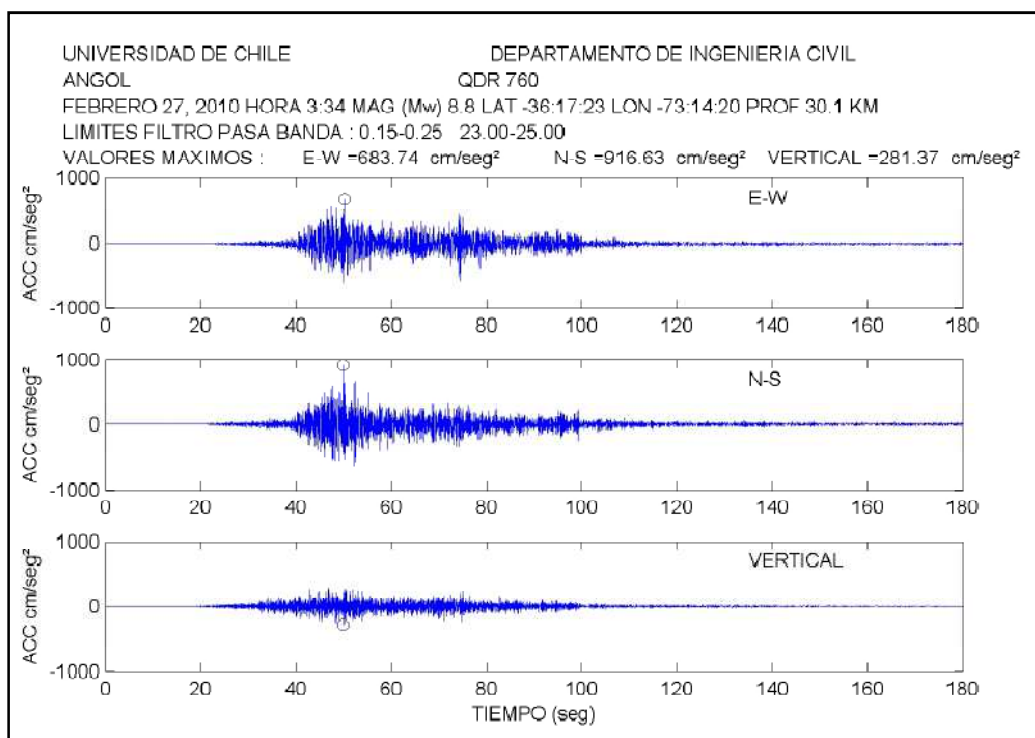


Figura 3:Registro de Aceleraciones en Angol.Boroscheket al.(2010, 2).

Las mayores aceleraciones registradas se tuvieron en la Región de la Araucanía, en la ciudad de Angol, que se encuentra a 175 km., del epicentro, se tuvo que la aceleración máxima de la componente N-S fue de 916.63 gals. En la figura 3 se presentan los registros de aceleraciones de las tres componentes en la ciudad de Angol; la componente vertical tuvo una aceleración máxima de 281.37 gals. Boroscheket *al.* (2010,2) no indican el tipo del suelo del registro. Al integrar dos veces las aceleraciones se obtienen los desplazamientos, los mismos que se indican en la figura 4; el desplazamiento máximo fue de 7.05 cm., para la componente E-W.

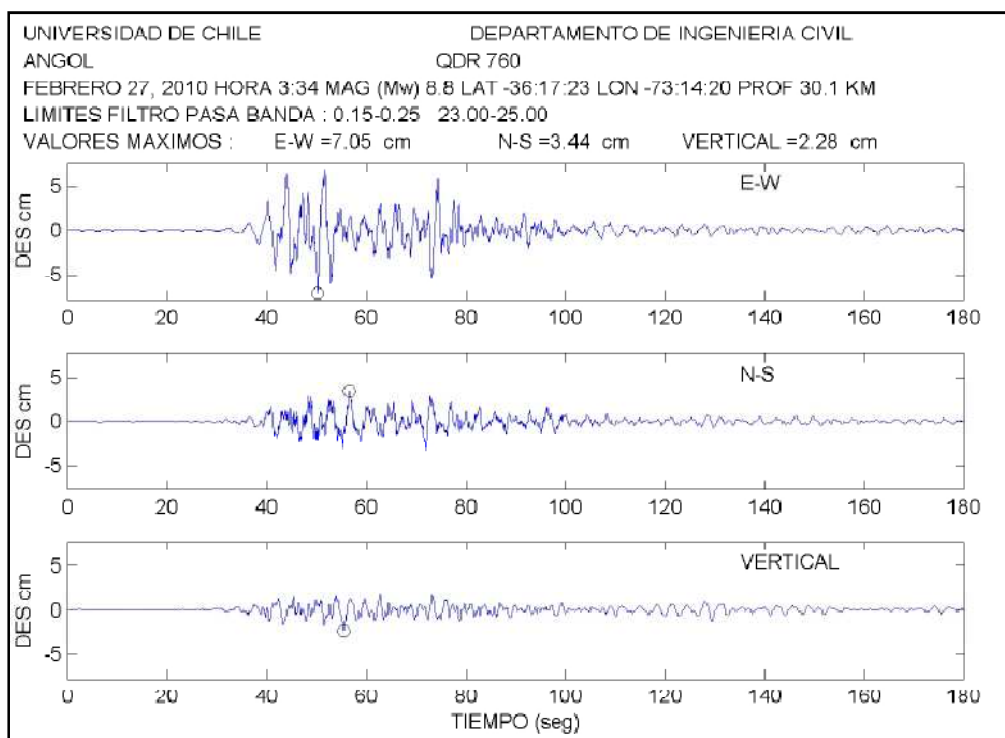


Figura 4: Registro de Desplazamiento en Angol. Boroschek et al. (2010, 2).

El sismo de Perú tuvo una duración de 175 seg., más largo que el de Chile. En la Figura 5 se indican los registros más cercanos disponibles y fueron obtenidos en la Universidad San Luis Gonzaga, en Ica a 180 km., del epicentro sobre un suelo tipo S3 (suelo blando) de acuerdo a la normativa técnica de Perú (2003). Este sismo tuvo varias fases intensas con una duración total que está entre 50 y 60 seg.

Por otra parte, los únicos registros del sismo de Ecuador, fueron obtenidos en la Red Sísmica del Austro, que se encuentra a más de 400 km., del epicentro de tal manera que se trata de acelerogramas con valores bastante bajos como se observa en la figura 6. Este sismo tuvo una duración de 120 seg., y la fase intensa dura 35 seg.

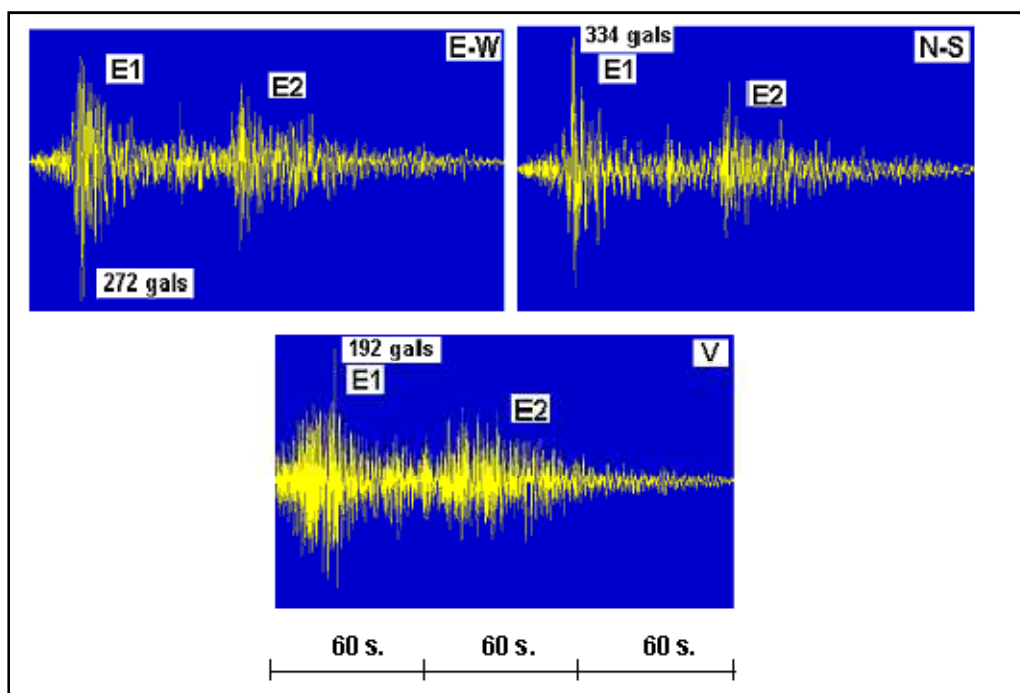


Figura 5: Registros de aceleraciones en U. San Luis Gonzaga. Aguiar (2008).

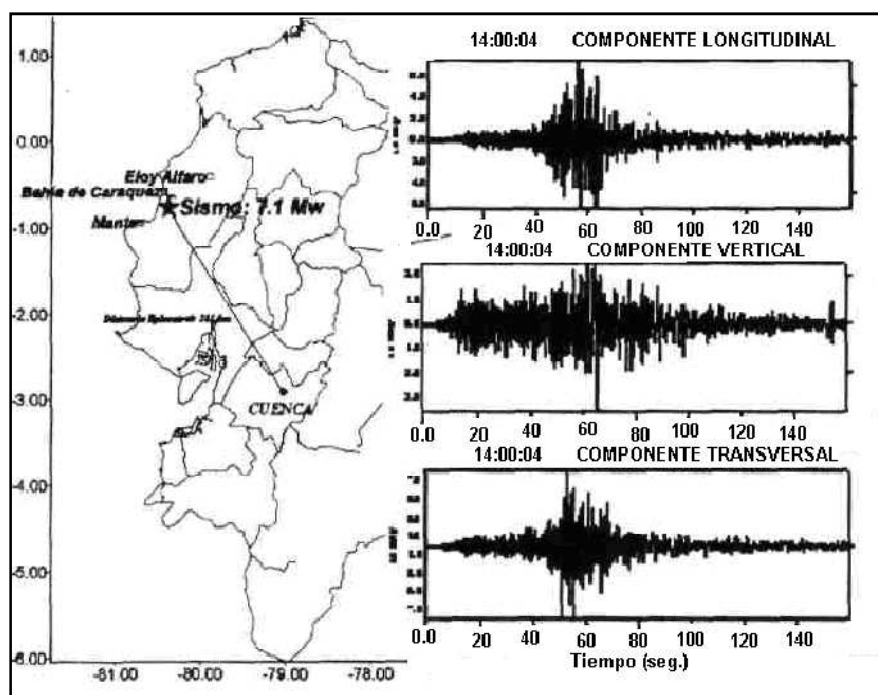


Figura 6: Registros de aceleraciones en U. de Cuenca. Red Sísmica del Austro (1998).

Los tres sismos analizados son de larga duración, ≥ 120 seg., con una fase intensa que está entre 35 y 60 seg., Por lo tanto, se trata de sismos muy peligrosos para las estructuras. Se destaca que se están analizando sismos que tuvieron una magnitud mayor a 7.0

3 Forma de los acelerogramas

El segundo punto de este artículo es ver la forma de los acelerogramas. En otro tipo de sismos normalmente se aprecia tres fases: la inicial, la intensa que causa daño y la final. Pero en los sismos analizados no sucede esto, parece ser que tuvieran por lo menos dos fases intensas.

Con respecto a los acelerogramas de la Figura 2, en la componente NS existen varios pulsos de energía muy importantes, parecería que a los 70 s., aproximadamente el sismo iba a finalizar pero nuevamente se presentó una nueva fase intensa que tuvo mayor duración que la anterior. Boroscheket al.(2010, 1).

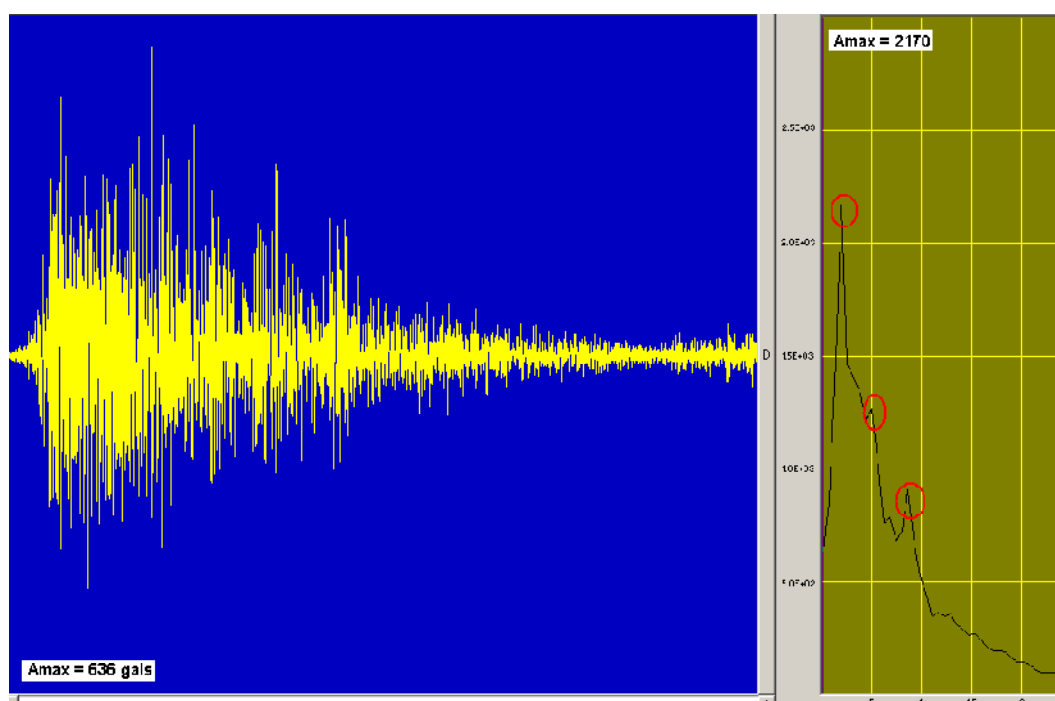


Figura 7: Acelerograma y espectro de componente N-S de San Pedro de la Paz.

Continuando con el sismo de Chile de 2010, se presenta a la izquierda de la figura 7 el acelerograma del registro de San Pedro de la Paz, muy cerca al epicentro, en suelo tipo II, la duración de este registro es de 160 seg., la aceleración máxima es de 636 gals, en la componente N-S y se aprecia claramente una gran cantidad de pulsos de energía, a la derecha se muestra el espectro que se comentará en el siguiente apartado. La aceleración máxima de la componente E-W de este registro fue de 594 gals y de la vertical 571 gals, valores muy parecidos.

Con relación al registro de aceleraciones del sismo de Perú de 2007, da la impresión de que hubieron dos sismos que en la figura 5 se han identificado como E1 y E2, cada uno de ellos tiene importantes pulsos de energía. Aguiar (2008), Aguilar (2007).

Para terminar con el análisis de algunos de los acelerogramas de los tres sismos; se aprecia que en los registros de Ecuador que también existen varios pulsos de energía en la Figura 6.

Por lo tanto, en los sismos interplaca tipo thrust o de bajo ángulo de buzamiento, con magnitud mayor a 7.0 se tienen una gran cantidad de pulsos de energía de gran magnitud.

4 Espectros de respuesta

A la derecha de la figura 7 se han resaltado con un círculo los principales peaks característicos del espectro de respuesta elástico hallados para un factor de amortiguamiento del 5%, para el registro de San Pedro de la Paz.

Por otra parte, en la figura 8 se muestra los espectros hallados con los registros de la U. de Chile y se nota que el número de picos altos es mayor, dando la impresión que ha mayor distancia se incrementa el número de estos peaks.

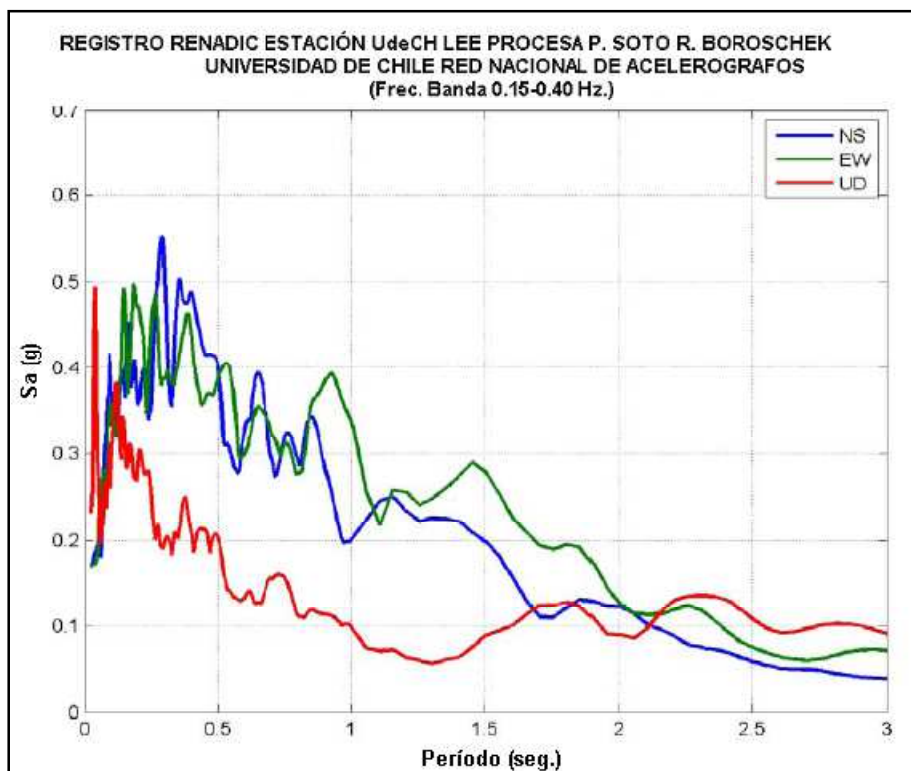
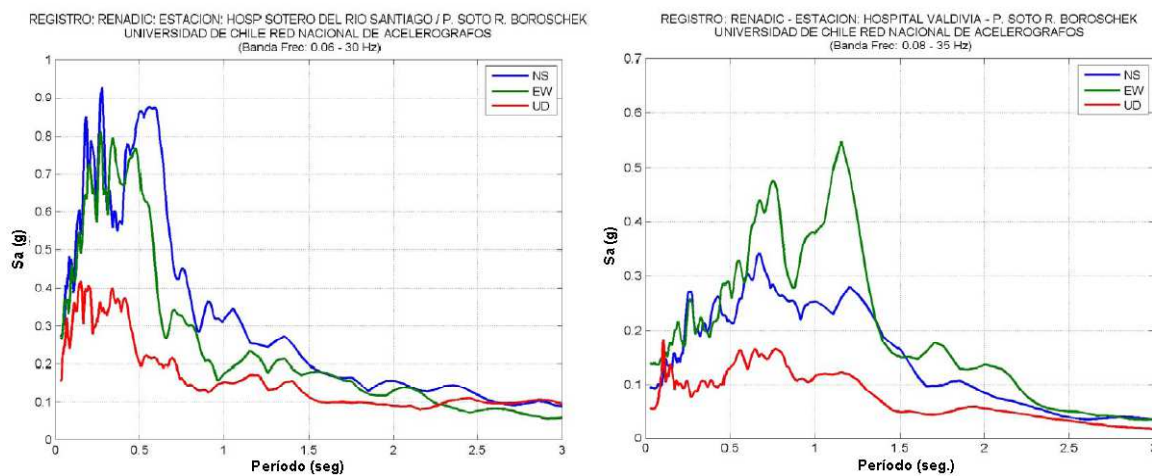


Figura 8: Espectros de aceleraciones. U. de Chile. Boroschek et al. (2010, 1)

En la figura 9 se presentan dos espectros obtenidos en estaciones un tanto lejanas del epicentro, la de la izquierda corresponde al Hospital Sotero, en Santiago y la derecha al Hospital de Valdivia. En las dos se aprecian varios peaks de similar magnitud, en varios puntos del espectro.

En el espectro de respuesta elástica, hallado para la componente E-W del registro obtenido en la U. San Luis Gonzaga, en la ciudad de Ica, Perú, se ven claramente 5 picos característicos, figura 10. En los otros espectros de esta figura también existen los peaks pero no son tan pronunciados como en la componente E-W. Se destaca que es en suelo S3.



Hospital Sotero Hospital Valdivia

Figura 9: Espectros en Hospital Sotero y Hospital Valdivia. Boroschek et al.(2010, 3).

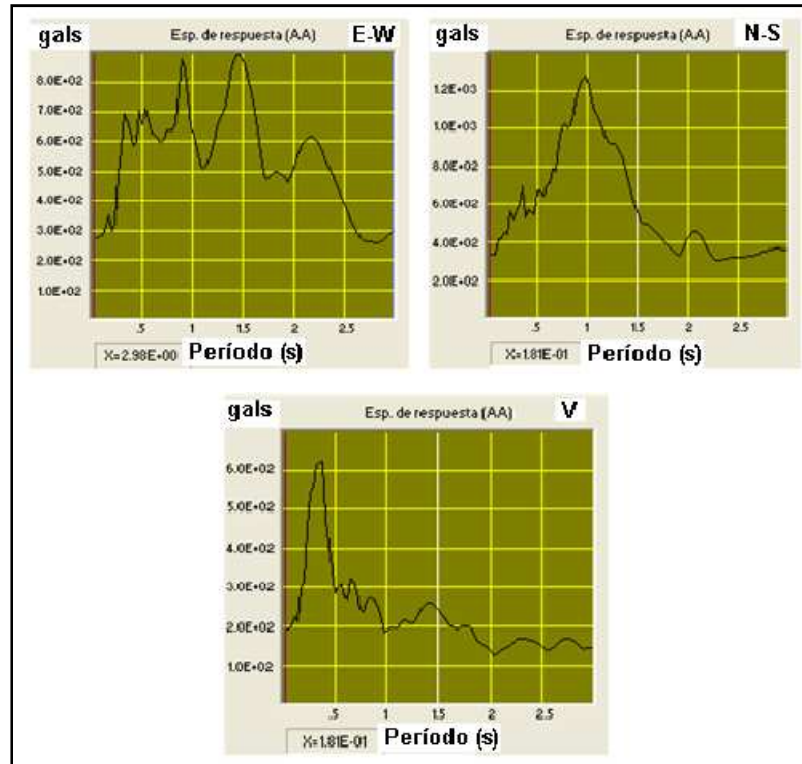


Figura 10: Espectro de respuesta de aceleraciones. U. San Luis Gonzaga.

En la figura 11 se muestran espectros, en Lima, a 160 km., del epicentro aproximadamente; el de la izquierda corresponde a un registro de Callao que se encuentra sobre suelo tipo S3 y el de la derecha a un registro en San Isidro sobre un suelo tipo S1. Evidentemente, que en el suelo S3 el rango del período en que se tienen varios picos característicos es mayor que el de suelo S1. Pero si llama la atención que en el espectro de San Isidro se tengan dos peaks altos en 0.75 seg., ya que en la Norma Técnica de Edificaciones de Perú E 030 de 1997 o en el Reglamento Nacional de Construcciones de (2003), para suelo S1 la plataforma del espectro de aceleraciones máximas es 0.40 seg., y para suelo S2 es 0.60 seg.

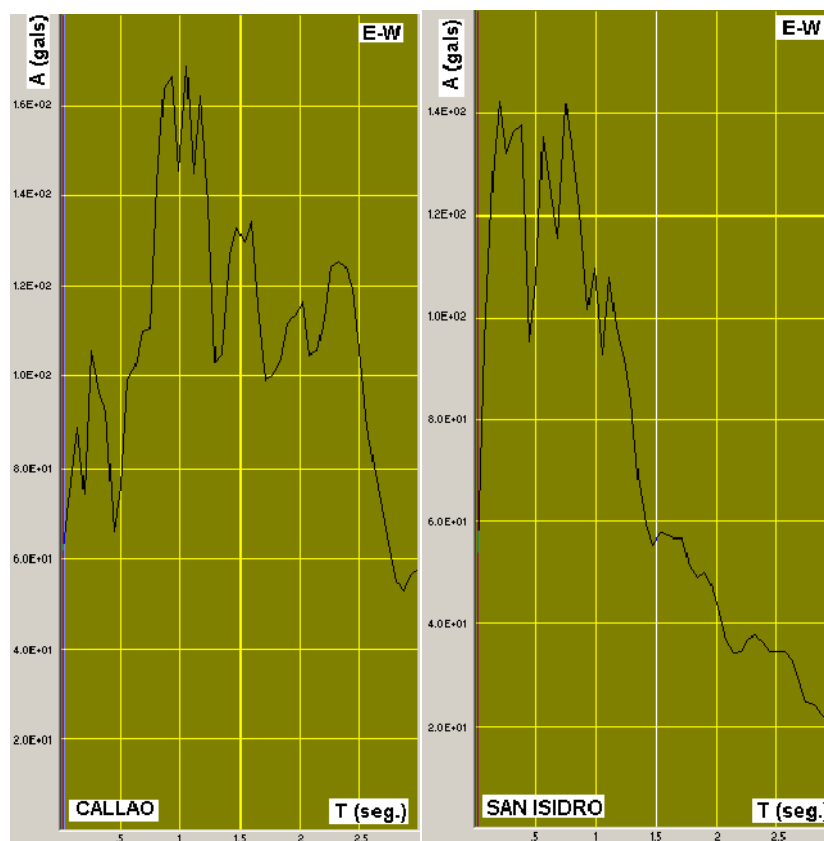


Figura 11: Espectros de respuesta hallados en Lima. Sismo de Perú de 2007.

Lo que se ha pretendido ilustrar con los espectros presentados, es la existencia de varios peaks característicos asociados a los sismos interplaca tipo thrust, tema que ya fue observado por Lobos (1999), Saragoni y Ruiz (2004), en donde se reconocen la presencia de dos peaks, uno debido al suelo y otro debido a la fuente sísmica. Ruiz y Saragoni (2005).

Para el sismo de Ecuador no se obtuvo espectros ya que los registros que se mostraron en la figura 4 presentan valores muy bajos. Es muy preocupante la situación de los espectros de diseño que constan en el Código Ecuatoriano, CEC-2000; debido a que estos fueron obtenidos a partir de registros sísmicos de magnitudes muy bajas, los mismos que fueron amplificados a los valores encontrados.

Los períodos en los cuales empieza la rama descendente del espectro del CEC-2000, para suelos tipo S1 y S2, que son de 0.50 y 0.52 seg., respectivamente se consideran bajos a la luz de lo visto en este artículo para sismos de subducción de bajo ángulo de buzamiento.

5 Intensidad de Arias

Una forma de medir el poder destructivo de los sismos, es mediante la Intensidad de Housner (1952) quien propuso la siguiente ecuación, para su evaluación.

$$I_H = \int_{0.1}^{2.5} S_v dT \quad (1)$$

Donde I_H es la Intensidad de Housner; S_v son las ordenadas del espectro de velocidad; T es el período. La mayor debilidad de este índice es que no considera la duración del sismo, que si se considera en la Intensidad de Arias (1970), quien proponer la siguiente ecuación.

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{tf} a^2(t) dt \quad (2)$$

Donde I_A es la intensidad de Arias; g es la aceleración de la gravedad; $a(t)$ es la aceleración del suelo; t es la variable tiempo; tf es el tiempo de duración del sismo. La Intensidad de Arias está relacionada con la raíz cuadrática media de la aceleración y esta se corresponde con el área debajo del espectro de energía total. Orozco y Alfaro (2008).

El Potencial Destructivo P_D propuesta por Araya y Saragoni (1985) es una variante a la I_A que toma en cuenta el contenido de frecuencias del sismo y se lo calcula con la siguiente expresión.

$$P_D = \frac{I_A}{v_o^2} \quad (3)$$

Donde v_o es el número de cruces del acelerograma por unidad de tiempo.

Se obtuvo la Intensidad de Arias de los tres registros hallados en San Pedro de la Paz (Sismo de Chile 2010) y en la Universidad San Luis Gonzaga (Sismo de Perú 2007). Los resultados se muestran en la tabla 1., donde también se indica la aceleración máxima del suelo.

Tabla 1: Intensidad de Arias.

Componente	Sismo de Chile de 2010		Sismo de Perú de 2007	
	A_{MAX} (gals)	I_A (cm/seg.)	A_{MAX} (gals)	I_A (cm/seg)
N-S	636	1731.1	334	363.8
E-W	594	1423.3	272	298.1
V	571	1123.6	192	145.9

La Intensidad de Arias para el sismo de Chile de 1985 (duración de 56 seg), registro de Lloleo que tuvo una aceleración máxima de 698.21 gals, es de: 1522.51 cm/seg. Orozco y Alfaro (2008). A pesar de que la aceleración máxima del registro de Lloleo es mayor a la aceleración máxima del registro de San Pedro de la Paz; la Intensidad de Arias resulta menor por el tiempo de duración del sismo.

6 Información Macrosísmica

La información macrosísmica, expresada mediante la construcción de Isosistas de Intensidades en las escala MSK (Medvedev *et al.* 1964) o en cualquier otra escala en forma macro dan una idea bastante precisa de como fue la propagación el movimiento del suelo y no solo esto, sino que como se verá en el siguiente numeral, permite encontrar la longitud de ruptura de un sismo y formular leyes de atenuación para ser usadas en estudios peligrosidad sísmica.

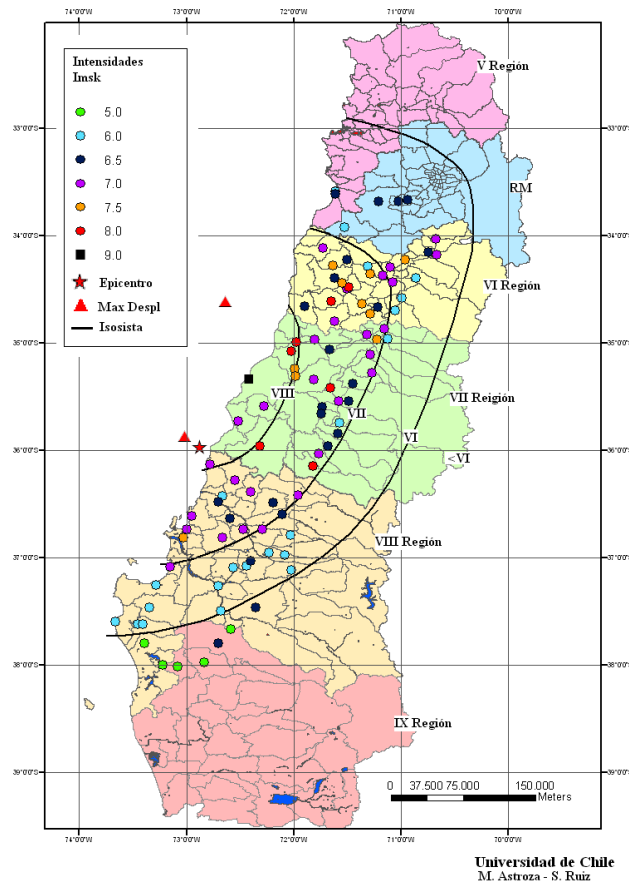


Figura 12: Intensidades en la escala MSK-64 e isosistas del terremoto del 27 de Febrero de 2010 (ASTROZA et al., 2010).

Existen metodologías para elaborar las curvas isosistas que relaciona la distribución del daño y la Intensidad (Monge y Astroza 1989). Esta metodología ha sido aplicada en Chile, aceptando que las viviendas de adobe pertenecen a una Clase A de vulnerabilidad, las viviendas de albañilería sin refuerzo a una Clase B de vulnerabilidad y las viviendas de albañilería confinada a una Clase C de vulnerabilidad.

Para el sismo de Chile de 2010, las intensidades se determinaron en 98 localidades por inspección visual de los daños de una muestra de viviendas de adobe y albañilería confinada ubicadas en un sector vecino a la Plaza de Armas de cada localidad, siendo el valor estimado representativo de las condiciones locales del sector revisado (Astroza et al., 2010).

En la Figura 12 se muestran las intensidades estimadas y las curvas isosistas trazadas a partir de estas intensidades. La forma regular de estas isosistas se debe a que representan las intensidades en un suelo Tipo II, según la clasificación de la norma NCh433 (1996), y por lo tanto no consideran los efectos beneficiosos o desfavorables que produce otro tipo de suelo.

En las isosistas del sismo de Perú de 2007 y de Ecuador de 1998, no se consideró el tipo de suelo en su elaboración pero como se verá posteriormente, la intensidad máxima es de VIII en la escala MSK y la forma es similar, alargada en sentido Norte-Sur.

7 Réplicas del sismo de Chile

En la Figura 13 se indica el hipocentro del sismo de Chile (ver estrella roja) junto con las réplicas con magnitud mayor que 4.7. Por cierto, en el recuadro de la derecha se indica las réplicas y el tiempo transcurrido en días. Como era de esperarse a medida que pasa el tiempo la actividad sísmica fue disminuyendo pero hubo una gran cantidad de réplicas en los primeros 20 días. En los primeros tres meses se han registrado 283 sismos con magnitud $M_w > 5$ y 22 sismos con magnitud $M_w > 6$. No ha habido réplicas con magnitud $M_w > 7$.

El sismo ocurrió sobre el límite del contacto entre la placa de Nazca y la placa sudamericana, en un área que tiene una longitud aproximada de 450 km. por 150 km. de ancho (Barrientos, 2010). En el primer recuadro de la Figura 13 se aprecia la parte superficial de la fosa marina, la misma que se halla aproximadamente a 130 km., de la costa y es el límite del desplazamiento súbito de la placa que dio origen al sismo de 2010.

8 Longitud de ruptura

Existen algunas fórmulas empíricas para encontrar la magnitud máxima de un sismo, en función de la longitud de ruptura L . La mayor parte de ellas tienen la forma siguiente:

$$M_{\max} = A \log L + B \quad (4)$$

Donde: $M_{\max}$ es la magnitud máxima esperada; A y B son constantes que se obtienen por regresión lineal.

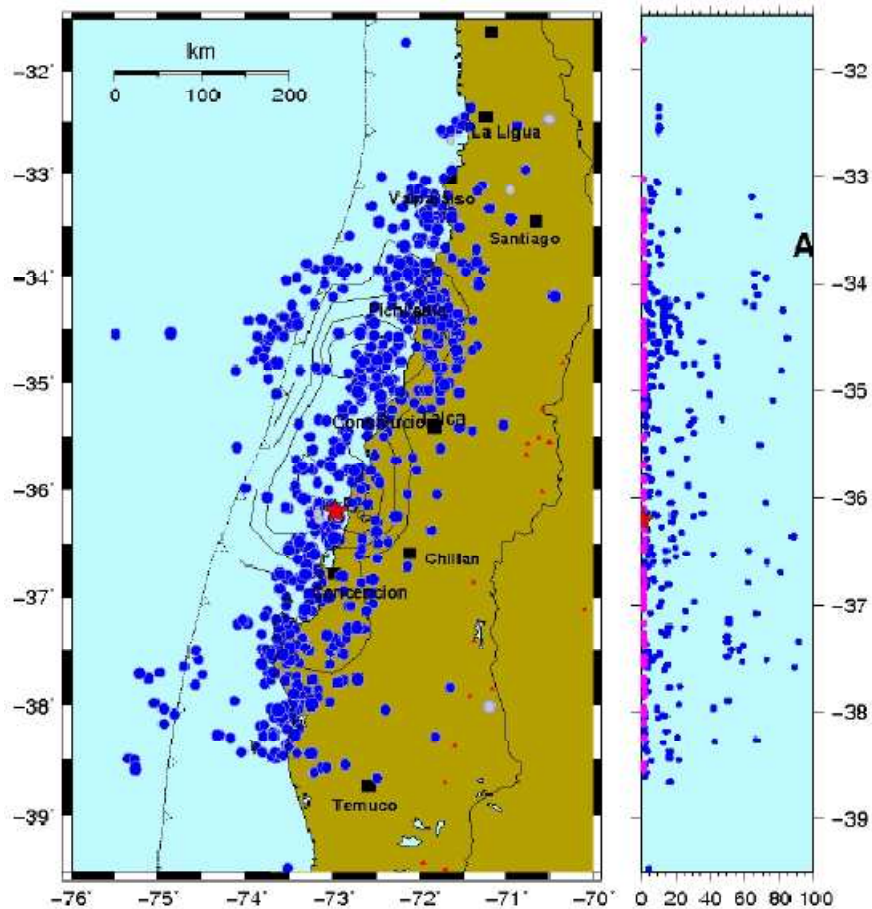


Figura 13: Réplicas del sismo del 27 de febrero de 2010.

Investigadores como Acharya (1979), proponen calcular las constantes A y B , en función de la localización geográfica. Otros como, Slemmons (1977), Grases (1980) recomiendan calcular estas constantes de acuerdo al tipo de falla.

Dorbath *et al.* (1990) propone calcular la longitud de ruptura L , midiendo el eje mayor de la curva de la isosista de intensidad $VIII$. Llegó a esta conclusión luego de estudio de las réplicas de varios sismos y demostró que la longitud mayor del área de las réplicas es aproximadamente igual a la longitud del eje mayor de la curva de isosistas de intensidad $VIII$. Se destaca que las réplicas se producen a lo largo de la longitud de ruptura y en los extremos de la misma, de tal manera que desde un punto visto riguroso, la longitud de ruptura es menor a la longitud de las réplicas. Retomando el tema se debe indicar que la ecuación propuesta por Dorbath *et al.* (1990) para hallar la magnitud máxima es la siguiente.

$$M_w = 1.62 \log L + 4.44 \quad (5)$$

Ccallo y Tavera (2002) incorporan un factor de ajuste K a la ecuación de Dorbath *et al*(1990) para poder encontrar la magnitud M_w a partir de isosistas de diferentes intensidades.

$$M_w = 1.62 \log \left(\frac{L}{K} \right) + 4.44 \quad (6)$$

Cuando se trabaja con la isosista de Intensidad VIII el valor de $K = 1$, para intensidad VII, se tiene $K = 2$. Para intensidad VI, el valor de $K = 4$. Lo importante es notar que se puede hallar la longitud de ruptura de un sismo, en forma aproximada, a partir de las curvas isosistas de intensidades.

Pero para sismos interplaca tipo thrust de gran magnitud (Chile 2010, Perú 2007, Ecuador 1998) como se destaca más adelante, la longitud de ruptura no está asociada con el eje mayor de la isosista de intensidad VIII sino a la de la isosista VII. De ahí que es importante estudiar las lecciones sismológicas dejadas por estos sismos.

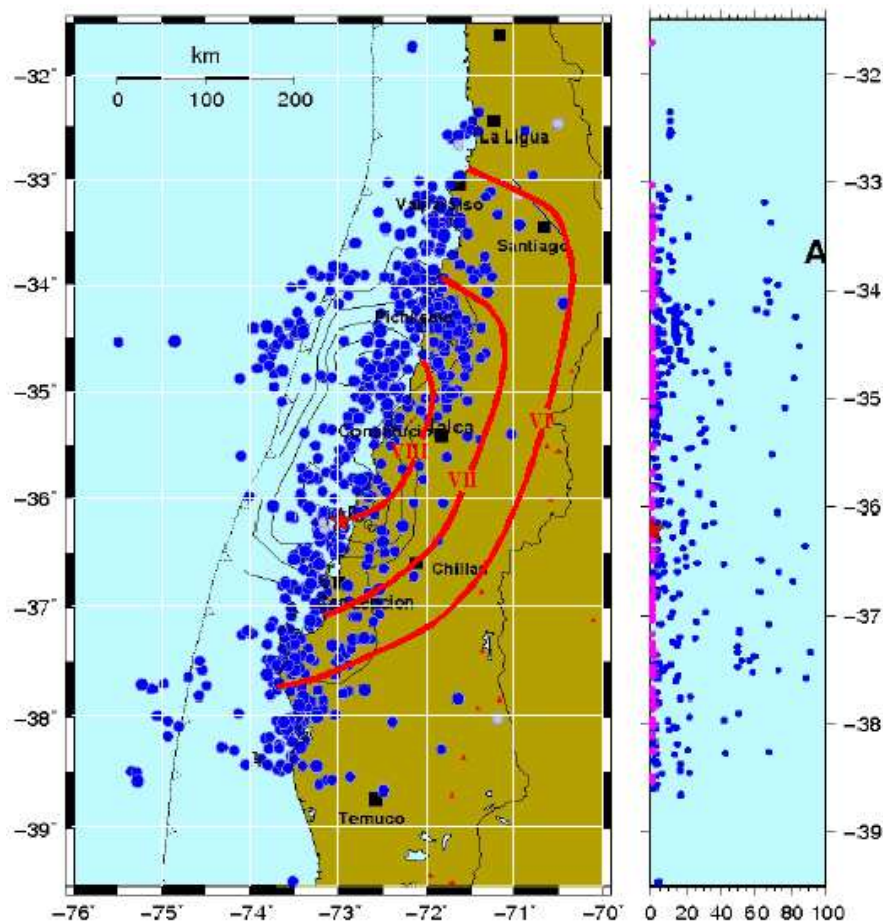


Figura 14: Área de ruptura, replicas e isosistas del sismo de Chile.

9 Réplicas e Isosistas

Con el propósito de ver la relación que existe entre las réplicas y las isosistas, se han unido las figuras 12 y 13, en la figura 14, donde se ve claramente que la isosista de intensidad VII se aproxima muy bien a la longitud de ruptura (mayor línea de igual deslizamiento). Por lo tanto, en el sismo de Chile de 2010 se cumple que la longitud mayor de la isosista de intensidad VII se aproxima mejor a la longitud de ruptura.

En la figura 15 se muestra la isosistas del sismo del Perú de 2007, elaboradas por Astroza (2008), la ubicación del epicentro, el mecanismo focal y las réplicas; el rectángulo que está con líneas discontinuas representa el área de ruptura. (TAVERA et al. 2008). En esta figura se observa que la isosista de intensidad VII se aproxima muy bien a la longitud de ruptura del sismo.

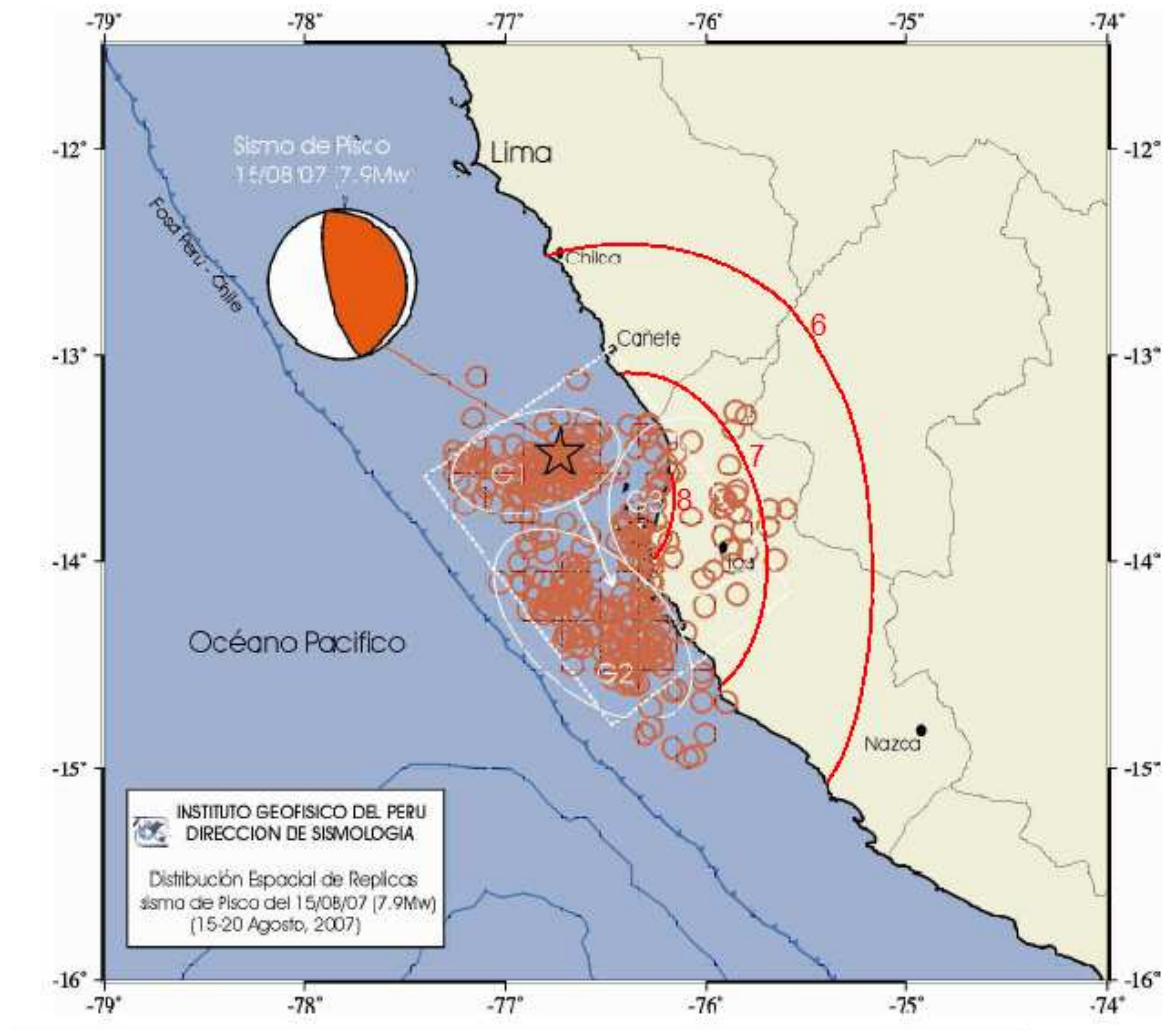


Figura 15: Área de ruptura, réplicas e isosistas del sismo de Pisco de 2007.

En la Figura 16 se presenta las isosistas del sismo del 4 de agosto de 1998, en Ecuador, elaboradas por Egred (1998) y las réplicas del sismo hasta diciembre de 1998. No se especifica el área de ruptura como en los otros dos sismos. Se entiende que la longitud de ruptura es menor a la longitud de todas las réplicas, con esta consideración se puede manifestar que la isosista de intensidad VII es la que mejor se aproxima a la longitud de ruptura del sismo. Por cierto la isosista de intensidad VIII es muy pequeña y cubre a las ciudades de Bahía de Caráquez, San Vicente y Canoa que fueron muy afectadas por el sismo.

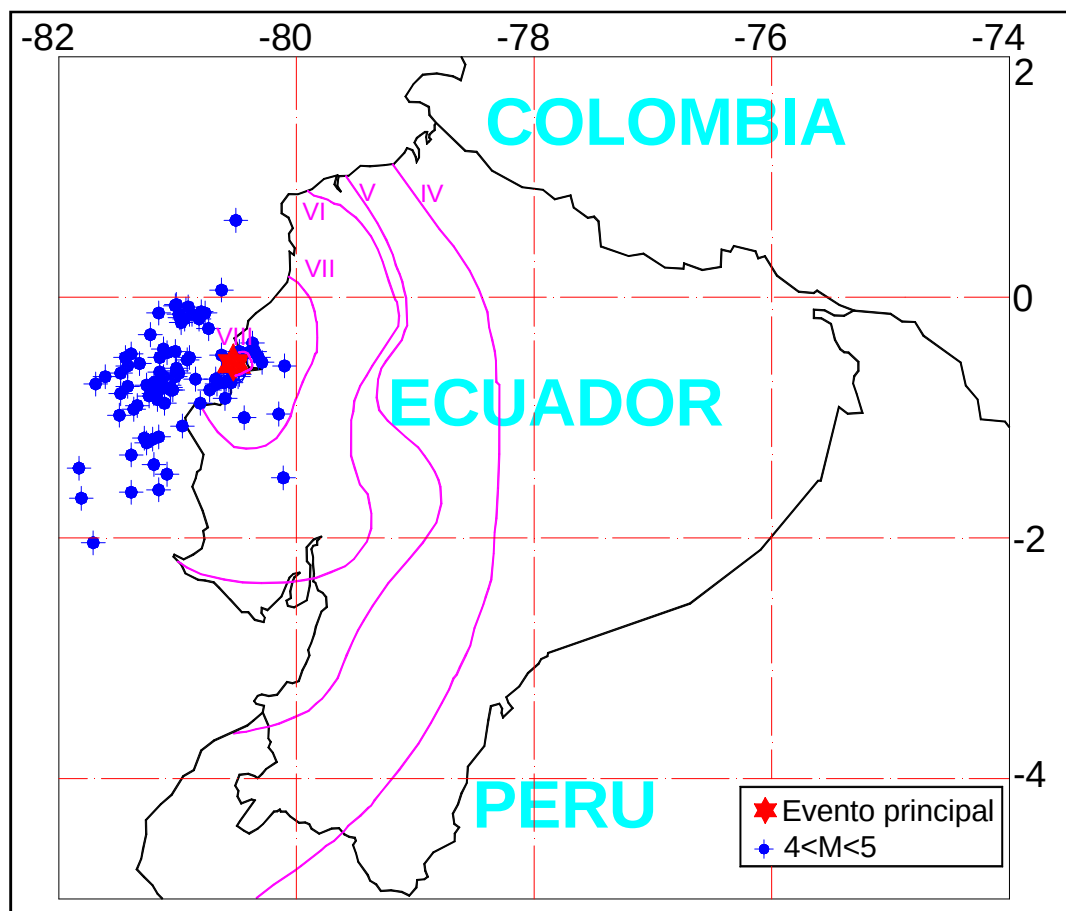


Figura 16: Réplicas e Isosistas del sismo del 4 de agosto de 1998.

10 Comentarios y Conclusiones

Se han analizado tres sismos interplaca tipo thrust registrados en: Chile, el 27 de febrero de 2010, $M_w = 8.8$; Perú, el 15 de agosto de 2007, $M_w = 7.9$ y Ecuador, el 4 de agosto de 1998, $M_w = 7.1$. Del estudio realizado se desprende lo siguiente:

- Los tres sismos fueron bastante largos, duraron más de 120 seg., con una fase intensa que está entre 35 y 60 seg.
- Son sismos que tienen muchos pulsos de energía.
- Los espectros de respuesta tienen varios peaks característicos, asociados con el período del suelo y la fuente sísmica.
- La Intensidad de Arias del sismo de Chile de 2010 reporta valores sumamente altos.
- La Isosista de intensidad VII es la que mejor se aproxima a la longitud de ruptura del sismo.

11 Agradecimiento

A Maximiliano Astroza, Profesor de la Universidad de Chile, por los valiosos comentarios y sugerencias dados en el transcurso de esta investigación.

Referencias

acharya H., (1979), "Regional variations in the rupture-length magnitude relationships and their dynamical significance", *Bulletin of Seismological Society of America*, **69** (6), 2063-2084.

AGUIAR R., ROMO M., TORRES M., CAIZA P., (1998), *El sismo de Bahía*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 125 p., Quito.

AGUIAR R., (2008), *Análisis Sísmico de Edificios*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 322 p., Quito.

AGUILAR Z., (2007), "Registros del sismo de Perú de 2007", *Información entregada personalmente en el CISMID*, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.

ARAYA R., and SARAGONI R., (1985), "Earthquake accelerogram destructives potencial factor", *Proceeding 8th World Conference on Earthquake Engineering*, EERI, 835-842, San Francisco.

ARIAS A., (1970), "A measure of earthquakes intensity, Seismic Desing for Nuclear Plants", *MIT Press*, R. J. Hansen editor, 438-469, Cambridge.

ASTROZA M., CABEZAS F., MORONI M., MASSONE L., RUIZ S., PARRA, E. CORDERO O., MOTTADELLI A., (2010) "Intensidades sísmicas en el área de daños del terremoto del 27 de febrero de 2010", www.eqclearinghouse.org, *PreleminaryReportNowAvailable*, EERI, *Chile EarthquakeClearinghouseMagnitude 8.8 onFebruary 27*, 2010.

ASTROZA M., (2008), "Intensidades y daños del terremoto de Pisco del 15 de agosto de 2007", *Libro: El sismo de Pisco de 2007*. Editor: H. Tavera, Instituto Geofísico del Perú., 125-147, Lima.

BARRIENTOS S., (2010), *Terremoto Cauquenes 27 de febrero de 2010. Informe Técnico actualizado 27 de mayo de 2010*, Servicio Sismológico. Universidad de Chile, 20 p. Santiago.

BOROSCHEK R., SOTO P., LEÓN R., COMTE D., (2010,1), *Terremoto Centro Sur Chile, 27 de febrero de 2010*. Red Nacional de Acelerógrafos, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, **Informe 1**, 9 p., Santiago.

BOROSCHEK R., SOTO P., LEÓN R., (2010,2), *Registros del terremoto de Maule, $M_w = 8.8$, 27 de febrero de 2010*. Red Nacional de Acelerógrafos, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, **Informe 5**, 100 p., Santiago.

BOROSCHEK R., SOTO P., LEÓN R., COMTE D., (2010,3), *Terremoto Centro Sur Chile, 27 de febrero de 2010 Informe Preliminar N.- 3*. Red Nacional de Acelerógrafos, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, **Informe 3**, 25 p., Santiago.

CEC-2000, *Código Ecuatoriano de la Construcción*, XIII Jornadas Nacionales de Ingeniería Estructural. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 325-350, Quito.

CCALLO F., TAVERA H., (2002), “Estimación de M_w a partir de isosistas de intensidad máxima para sismos de subducción ocurridos en el Perú”, *Compendio de trabajos de investigación, CNDG-Biblioteca, Instituto Geofísico del Perú*, v. 3, 59-70, Lima.

DORBATH L., CISTERNA A., DORBATH C., (1990), “Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **80 (3)**, 551-576.

EGRED, J., (1998), “Asignación de Intensidades”, *El terremoto de Bahía de Caráquez – Ecuador, 4 de agosto de 1998. Lecciones por aprender. Politécnica Nacional*, Capítulo III, página 15, Quito.

GRASES, J., (1980), *Investigación sobre los sismos destructores que han afectado al Centro y Occidente de Venezuela*, Proyecto INTEVEP, Caracas, Venezuela.

HOUSNER, G., (1952), “Spectrum intensities of Sorong motion earthquakes”, *Proc. Symp., of earthquake and blast effect on structures*, EERI, 835-842, Los Angeles.

KANAMORI, H. (2010), “Sismología de grandes Terremotos”, *Conferencia Magistral dictada en la inauguración del X Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica*. Universidad de Chile, Santiago de Chile.

LOBOS, C., (1999), “Efecto del mecanismo de las ondas superficiales y del suelo en los acelerogramas del terremoto de Chile del 3 de marzo de 1985”, *Memoria de Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile*, Santiago de Chile.

MEDVEDEV, S., SPONHEUR, W., KÁRNIK, V., (1964), “Neue Seismische Skale”, *Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Helf 77*, Akademie Verlag, 1964.

MONGE, J. y M. ASTROZA, (1989), “Metodología para determinar el grado de intensidad a partir de los daños”, *5as Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Vol. 1, 483-492, Santiago, Chile.

NORMA NCh 433. Of 96, (1996), *Diseño Sísmico de Edificios*, Instituto de Normalización, INN-Chile, 42 p., Santiago.

NORMA TÉCNICA DE EDIFICACIONES E.030, (1997), *Diseño Sismo Resistente. Reglamento Nacional de Construcciones*, Ministerio del Transporte y Comunicaciones, Lima.

OROZCO, L., ALFARO, I., (2008), “Potencial Destructivo de los Sismos. Segunda Parte, *Cuaderno de la Facultad. Universidad de Salta*, 3, 33-44, Salta.

REGLAMENTO NACIONAL DE CONSTRUCCIONES (2003), *Norma Técnica de edificación E 030. Diseño Sismorresistente*, SENCICO Servicio Nacional de Normalización, Capacitación e Investigación para la Industria de la Construcción, 38 p., Lima.

RUIZ, S., SARAGONI, R., (2005), “Propuesta de espectros de respuesta de aceleraciones con 2 peaks para las normas de diseño sísmico chileno que considera el efecto de suelo y del tipo de terremoto subductivo”, *9nas Jornadas. Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica. ACHISINA 2005*, 16 p., Concepción.

SARAGONI, R., RUIZ, S., (2004), “Modelos elásticos 1D para la respuesta dinámica de suelos obtenidas del análisis de acelerogramas de sismos de Chile Central”, *Proc. 5to Congreso Chileno de Geotecnia*, Chile.

SLEMMONS, D. B., (1977), *State-of-the-art for assessing earthquake hazards in the United States, Report 6. Faults and earthquake magnitude: U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experimental Station, Soil and Pavements Laboratory, Vicksburg, Mississippi, Miscellaneous Paper S-73-1*, 129 p.

TAVERA, H., BERNAL, J., SALAS, H., (2008,1), “El terremoto de Pisco del 15 e agosto de 2007: Aspectos sismológicos”, *Libro: El sismo de Pisco de 2007. Editor H. Tavera, Instituto Geofísico del Perú*, 13-22, Lima.

TAVERA, H.; SALAS, H., JIMÉNEZ, C.; ARREDONDO, L.; PARILLO, R., MILLONES, J., (2008,2), “Intensidades regionales asociadas al terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007”, *Libro: El sismo de Pisco de 2007. Editor: H. Tavera, Instituto Geofísico del Perú*, 29-33, Lima.

Analysis of three inter-plate seism of the thrust type, registered in: Chile 2010, Peru 2007 y Ecuador 1998

Abstract

Three interplate seism of the thrust type are analyzed, they were registered on February 27th, 2010 in Chile and had a magnitude of $M_w=8.8$; on August 15th, 2007 in Peru, that had $M_w=7.9$ and on August 4th, 1998 that had $M_w=7.1$. Five issues are analyzed in this article and they are: the time that the seism lasted, the shape of the acelerograms and the elastic spectrums of response; the intensity of Arias and the relation between isoseismical curves and the length of the rupture.

Keywords: Isoseismical curves. Interplate thrust type. Length of the rupture.

1 Introduction

The mega earthquake of Chile, on February 27th, 2010 occurred at 03:34 a.m. local time and had a magnitude $M_w = 8.8$, becoming the strongest earthquake instrumentally registered worldwide (Kanamori, 2010). The hypocenter or the place where rupture began was located on the geographical coordinates: 36° 17' 23" S., and 73° 14' 20" W., at 30.1 km depth (Barrientos, 2010).

The earthquake of Peru, on August 15th, 2007, was registered at 6:40 p.m. local time; it had a magnitude $M_w = 7.9$ becoming the strongest seismic event registered in the region during the last 292 years; the hypocenter coordinates were: 13.49° S. and 76.85° W, the focal depth was 26 km. (Tavera *et al.* 2008,1).

The last earthquake registered in Ecuador and which caused great damage in structures was Bahía de Caráquez Earthquake, on August 4th, 1998, it had a magnitude $M_w = 7.1$; the hypocenter coordinates were: 0.55° S., and 80.53° W., and the focal depth was 39 km. (Aguiar *et al.* 1998).

Due to the focus location, in relation to the focus and the focal depth, of the three mentioned earthquakes (from 20 to 40 km) it is concluded that they were interplate earthquakes of the thrust type. In figure 1, a scheme of this type of earthquakes is shown.

2 Earthquake duration

The seismic response of a structure is a function of the earthquake duration time, for this reason those times are indicated in this section for the studied earthquakes.

The earthquake of Chile had lasted 140 sec., with an intense phase that varied from 40 to 50 sec., as figure 2 shows, which corresponds to a register in Santiago, in the University of Chile, on

soil of type II in accordance to Chile Norm 1996. It is appreciated that the three registers have similar values so that the vertical component had close values to the horizontal component for soils of type II, for soils of type III it did not happen in Santiago de Chile.

The main registered accelerations were presented in Araucanía Region in Angol City that is located 175 km from the epicenter; the maximum acceleration of the N-S component was 916.63 gals. In figure 3, the acceleration registers are presented for the three components in Angol City; the vertical component had a maximum acceleration of 281.37 gals. Boroschek *et al.* (2010,2) do not indicate the soil type of the register. When the accelerations are integrated two times, the displacements are obtained, which are indicated in figure 4; the maximum displacement was 7.05 cm, for the E-W component.

The earthquake of Perú lasted 175 sec., longer than the earthquake of Chile. In figure 5, the closer available registers are indicated and they were obtained in San Luis Gonzaga University, in Ica 180 km. from the epicenter on a soil of type S3 (soft soil) according to the Technical Norm of Perú (2003). This earthquake had several intense phases with a total duration that is between 50 and 60 seconds.

On the other hand, the scant registers of the earthquake of Ecuador were obtained in the Southern Seismic Network, which is located more than 400 km. from the epicenter so that it is the case of accelerograms with quite low values as figure 6 shows. This earthquake had a duration of 120 sec. and the intense phase lasted 35 sec.

The three analyzed earthquakes had long duration, ≥ 120 sec., with an intense phase that was between 35 and 60 sec. Therefore they were quite dangerous earthquakes for structures. It is emphasized that earthquakes, which had magnitudes higher than 7.0, are being analyzed.

3 Shape of accelerograms

The second point of this article is to observe the shape of accelerograms. For other type of earthquakes three phases are normally appreciated: the initial, the intense that causes damage and the final. But it does not happen in the analyzed earthquakes, they seem to have two intense phases at least.

With respect to the accelerograms of figure 2, in the N-S component there are several quite important energy pulses, it would seem that the earthquake was going to finish about 70 sec. later but a new intense phase was presented again and its duration was longer than the previous one. Boroschek *et al.* (2010,1).

Continuing with the earthquake of Chile 2010, the accelerogram of San Pedro de La Paz register is presented on the left of figure 7, it was quite near the epicenter, on soil of type II, the duration of this register was 160 sec., the maximum acceleration was 636 gals in the N-S component and a great quantity of energy pulses is clearly appreciated, the spectrum that will be commented on the next section is shown on the right. The maximum acceleration of the E-W component of this register was 594 gals and the correspondent to the vertical component was 571 gals, quite similar values.

In relation to the acceleration register of the earthquake of Perú 2007, it causes the impression that two earthquakes occurred and they have been identified in figure 5 as E1 and E2, each of them has important energy pulses. Aguiar (2008), Aguiar (2007).

To finish the analysis of some accelerograms of the three earthquakes; it is appreciated in figure 6 that there are also several energy pulses in the registers of Ecuador.

Therefore, in the interplate earthquakes of the thrust type or those with a low dip angle, with magnitude higher than 7.0, there is the presence of a great quantity of great energy pulses.

4 Response spectra

On the right of figure 7, the main characteristic peaks of the elastic response spectrum have been highlighted with a circle, it was found out for a damping factor of 5% for the register of San Pedro de la Paz.

On the other hand, figure 8 shows the spectra found out with the registers of the University of Chile and it is observed that the number of high peaks is greater, causing the impression that as the distance is longer, the number of these peaks increases.

In figure 9, two spectra obtained in stations that are rather distant from the epicenter, the one on the left corresponds to Sotero Hospital in Santiago and the other one on the right corresponds to Valdivia Hospital. It is appreciated that both of them have several peaks with similar magnitude in many points of the spectrum.

In the elastic response spectrum, which was found out for the E-W component of the register obtained in San Luis Gonzaga University in Ica City, Perú, 5 characteristic peaks are clearly seen, figure 10. In the spectra shown by this figure there are also peaks, but they are not too marked as those for the E-W component. It is emphasized that it is a S3 soil.

In figure 11, spectra are shown in Lima, about 160 km. from the epicenter; the one on the left corresponds to a register of Callao that is on S3 soil and the other one on the right corresponds

to a register of San Isidro on S1 soil. Evidently in S3 soil, the period range in which there are several characteristic peaks is greater than the range in S1 soil. But it attracts the attention due to the fact that within 0.75 sec. there are two high peaks in San Isidro spectrum, since in the Technical Norm for Buildings of Perú E 30 1997 or in the National Code for Buildings (2003), for S1 soil the stage of the maximum acceleration spectrum is 0.40 sec and for S2 soil, it is 0.60 sec.

The intention was to illustrate with the presented spectra, the existence of several characteristic peaks associated with interplate earthquakes of the thrust type, topic that was already observed by Lobos (1999), Saragoni and Ruiz (2004), where the presence of two peaks is acknowledged, one of them due to soil and the other one due to the seismic source. Ruiz y Saragoni (2005).

For the earthquake of Ecuador, spectra were not obtained because the registers shown in figure 4 present quite low values. It is quite concerning the situation of the design spectra that are in the Ecuadorian Code, CEC-2000; because they were obtained from seismic registers with quite low magnitudes, and they were amplified to the found values.

The periods in which the descendent branch of the spectrum of CEC-2000, for S1 and S2 soils, which are respectively 0.50 and 0.52 sec., are considered low to what was seen in this article for subduction earthquakes with low dip angle.

5 Intensity of Arias

One manner to measure the destructive power of earthquakes, is by means of the Intensity of Housner (1952) who proposed the following equation, for its evaluation.

$$I_H = \int_{0.1}^{2.5} S_v dT \quad (1)$$

Where I_H is the Intensity of Housner, S_v are the velocity spectrum ordinates; T is the period. The major weakness of this factor is that it does not consider the duration of the earthquake, which is considered in the Intensity of Arias (1970), who proposed the equation below:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_f} a^2(t) dt \quad (2)$$

Where I_A is the Intensity of Arias; g is the gravity acceleration; $a(t)$ is the ground acceleration; t is the time variable; tf is the time of duration of the earthquake. The Intensity of Arias is related to the root mean square of the acceleration and it corresponds to the area under the total energy spectrum. Orozco and Alfaro (2008).

The Destructive Potential P_D proposed by Araya and Saragoni (1985) is a variant of I_A that takes into account the content of frequencies of the earthquake and is calculated with the expression below:

$$P_D = \frac{I_A}{\nu_o^2} \quad (3)$$

Where ν_o is the number of crossings of the accelerogram by time unit.

The Intensity of Arias was obtained from the three registers found in San Pedro de la Paz (Earthquake of Chile 2010) and in San Luis Gonzaga University (Earthquake of Perú 2007). The results are shown in table 1, where the maximum ground acceleration is also indicated.

Table 1: Intensity of Arias

Component	Earthquake of Chile 2010		Earthquake of Perú 2007	
	A_{MAX} (gals)	I_A (cm/sec)	A_{MAX} (gals)	I_A (cm/sec)
N-S	636	1731.1	334	363.8
E-W	594	1423.3	272	298.1
V	571	1123.6	192	145.9

The intensity of Arias for the earthquake of Chile 1985 (duration of 56 sec.), register of Lloleo that had a maximum acceleration of 698.21 gals, is: 1522.51 cm/sec. Orozco and Alfaro (2008). Although the maximum acceleration of the register corresponding to Lloleo is higher than the maximum acceleration of the register of San Pedro de la Paz; the Intensity of Arias proves to be lower due to the time of duration of the earthquake.

6 Macro-seismic Information

The macro-seismic information, expressed by means of the elaboration of Isoseismals of Intensity in MSK scale (Medvedev *et al.* 1964) or in any other scale, in a macro manner give a quite accurate idea about how the propagation of soil movement was, and not only that, but also it allows to find the rupture length of an earthquake and formulate attenuation laws to be used in seismic hazard studies.

There are methodologies to elaborate isoseismal curves that relate damage distribution and Intensity (Monge and Astroza 1989). This methodology has been applied in Chile, accepting that houses made of adobe belong to a class A of vulnerability; houses made of masonry without reinforcement belong to a Class B of vulnerability and houses made of confined masonry belong to a Class C of vulnerability.

For the earthquake of Chile 2010, intensities were determined in 98 localities by means of visual inspection of damages of a sample of houses made of adobe and confined masonry, located on a zone near the Parade Ground of each locality, being the estimated value representative of the local conditions of the reviewed zone (Astroza *et al.*, 2010).

In Figure 12, the estimated intensities are shown and the isoseismal curves were traced from these intensities. The regular shape of these isoseismals is due to they represent the intensities on soil of type II, in accordance to classification of NCh433 Norm (1996), and therefore they do not consider the beneficial or unfavorable effects that other type of soil produces.

In the isoseismals of the earthquake of Perú 2007 and of Ecuador 1998, the type of soil was not considered for their elaboration, but as it will be seen later, the maximum intensity was VIII according to MSK scale and the shape is similar, lengthened in the North-South direction.

7 Aftershocks of the Earthquake of Chile

In figure 13, the hypocenter of the earthquake of Chile is shown (see red star) with the aftershocks of magnitude higher than 4.7. In fact, the aftershocks and the elapsed time in days are indicated on the right square. As it was expected, as time passed, the seismic activity was decreasing, but there was a great quantity of aftershocks during the first 20 days. In the three first months, 283 earthquakes were registered with magnitude $M_w > 5$ and 22 earthquakes with magnitude $M_w > 6$. There were not aftershocks with magnitude $M_w > 7$.

The earthquake occurred over the contact limit between Nazca plate and South American plate, on an area that has about 450 km.length and 150 km. width (Barrientos, 2010). On the first square of figure 13, the shallow part of the marine fosse is appreciated, which is located about 130 km. from the coast and it is the sudden displacement limit of the plate that originated the earthquake 2010.

8 Rupture Length

There are some empirical formulae to find out the maximum magnitude of an earthquake, as a function of the rupture length L . Most of them have the pattern below:

$$M_{\max} = A \log L + B \quad (4)$$

Where: $M_{\max}$ is the maximum expected magnitude; A and B are constants that are obtained by means of linear regression.

Investigators such as Acharya (1979), propose the calculation of the constants A and B , as a function of the geographical location. Others, such as Slemmons (1977), Grases (1980) recommend calculating these constants according to the type of failure.

Dorbath *et al.* (1990) proposes to calculate the rupture length L , by measuring the main axis of the isoseismal curve with intensity *VIII*. He reached this conclusion after studying the aftershocks of several earthquakes and he demonstrated that the major length of the aftershock area is almost equal to the length of the main axis of the isoseismal curve with intensity *VIII*. It is emphasized that aftershocks are produced along the rupture length and on its extremes, so that from a rigorous viewpoint, the rupture length is shorter than the length of aftershocks. Restudying the topic, it must be indicated that the equation proposed by Dorbath *et al.* (1990) to find out the maximum magnitude is the following:

$$M_w = 1.62 \log L + 4.44 \quad (5)$$

Callo y Tavera (2002) incorporate an adjusting factor K to the equation of Dorbath *et al.* (1990) in order to find out the magnitude M_w from isoseismals for different intensities.

$$M_w = 1.62 \log \left(\frac{L}{K} \right) + 4.44 \quad (6)$$

When the isoseismal for intensity VIII is used, the value $K = 1$, for intensity VII, $K = 2$. For intensity VI, the value $K = 4$. It is important to note that the rupture length of an earthquake can be found out in a rough manner from the isoseismal curves of intensity.

In contrast, for interplate earthquakes of the thrust type with great magnitude (Chile 2010, Perú 2007, Ecuador 1998) as it will be emphasized later, the rupture length is not associated with the main axis of the isoseismal for intensity VIII, but it is associated with the isoseismal for intensity VII. Therefore, it is important to study the seismologic lessons given by these earthquakes.

9 Aftershocks and Isoseismals

In order to observe the relation that exists between aftershocks and isoseismals, figures 12 and 13 have been joined in figure 14 where it is clearly seen that the isoseismal for intensity VII quite reaches the rupture length (major line with equal displacement). Therefore, in the earthquake of Chile 2010 it is fulfilled that the length of the main isoseismal for intensity VII is better approximated to the rupture length.

Figure 15 shows the isoseismals of the earthquake of Perú 2007, elaborated by Astroza (2008), the epicenter location, the focal mechanism and the aftershocks; the rectangle that is drawn with discontinuous lines, represents the rupture area (Tavera *et al.* 2008). In this figure, it is observed that the isoseismal for intensity VII closely approximates to the rupture length of the earthquake.

Figure 16 shows the isoseismals of the earthquake occurred in Ecuador on August 4th, 1998, they were elaborated by Egred (1998) and the aftershocks corresponding to the earthquake until December, 1998. The rupture length is not specified as it is done for the other two earthquakes. It is understood that the rupture length is shorter than the length of all the aftershocks, with this consideration it is possible to manifest that the isoseismal for intensity VII is the best approximation to the rupture length of the earthquake. In fact, the isoseismal for intensity VIII is quite small and covers the cities of Bahía de Caráquez, San Vicente and Canoa, which were quite affected by the earthquake.

10 Comments and Conclusions

Three interplate earthquakes of the thrust type have been analyzed, they were registered in: Chile on February 27th, 2010, $M_w = 8.8$; Perú on August 15th, 2007, $M_w = 7.9$; and Ecuador on August 4th, 1998, $M_w = 7.1$. From the studied that was carried out, the following is derived:

- The three earthquakes were quite long, they lasted more than 120 sec., with an intense phase that is between 35 and 60 sec.
- They are earthquakes with many energy pulses.
- Response spectra have several characteristic peaks, associated with the ground period and the seismic source.
- The Intensity of Arias of the earthquake of Chile 2010 presents extremely high values.
- The isoseismal for Intensity VII is the best approximation to the rupture length of the earthquake.

11 Gratefulness

To Maximiliano Astroza, Professor of the University of Chile, for his valuable comments and suggestions, which were given during the development of this investigation.