

# LOS SISMOS IMPULSIVOS Y LA NECESIDAD DE CONSIDERAR FACTORES “NEAR FAULT” EN EL ESPECTRO PARA DISEÑO DE ESTRUCTURAS EN QUITO

**Roberto Aguiar Falconí<sup>(1)</sup>, David Castillo<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup>Centro de Investigaciones Científicas, CEINCI.  
Universidad de Fuerzas Armadas ESPE  
Valle de los Chillos, Ecuador

<sup>(2)</sup>Carrera de Ingeniería Civil  
Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción  
Valle de los Chillos, Ecuador

## RESUMEN

Algunos de los sismos impulsivos, registrados a nivel mundial y que dejaron grandes pérdidas humanas y económicas son los registrados en: Loma Prieta-USA (1989), Northridge-USA (1994), Kobe-Japón (1995), Chichi-Taiwan (1999), Duzce-Turquía (1999), entre otros fueron terremotos de corta duración pero con un enorme poder destructivo.

La ciudad de Quito al encontrarse en el del sistema de fallas ciegas que atraviesan la ciudad, tiene gran probabilidad de ocurrencia de un sismo impulsivo, razón por la cual en el espectro de diseño encontrado en la microzonificación sísmica de Quito de 2012, se ha incluido un factor que incrementa las aceleraciones espectrales.

En este trabajo se presentan los factores de sitio encontrados al aplicar la Metodología de Spudich y Chiou (2008) con la ley de atenuación de Boore y Atkinson (2008)

**Palabras claves:** Factor de Cercanía; Factor de Directividad; Factor Near Fault; Hanging Wall.

## ABSTRACT

Some impulsive earthquakes registered globally that caused great human and economic losses are recorded in: Loma Prieta-USA (1989), Northridge, USA (1994), Kobe, Japan (1995), Chichi,Taiwan (1999 ), Duzce, Turkey (1999), among others were earthquakes of short duration but with enormous destructive power.

The city of Quito, found in the Hanging Wall of the blind fault system running through the city, has a high probability of experiencing an impulsive earthquake. For this reason, a factor that increases the spectral accelerations has been included in the design spectrum found in the seismic microzonation of Quito in 2012.

This paper presents site factors found by applying the methodology if Spudich and Chio (2008) with the attenuation law of Boore ang Atkinson (2008).

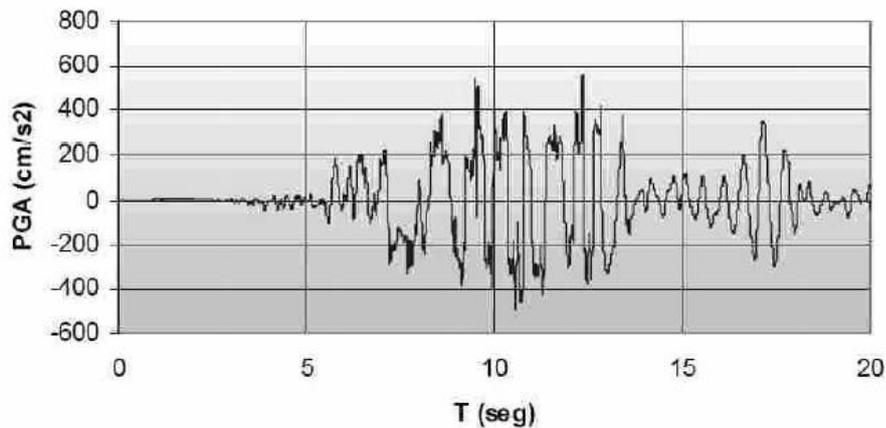
Keywords: Closeness factor, directivity factor, Factor Near Fault; Hanging Wall.

## SISMOS IMPULSIVOS

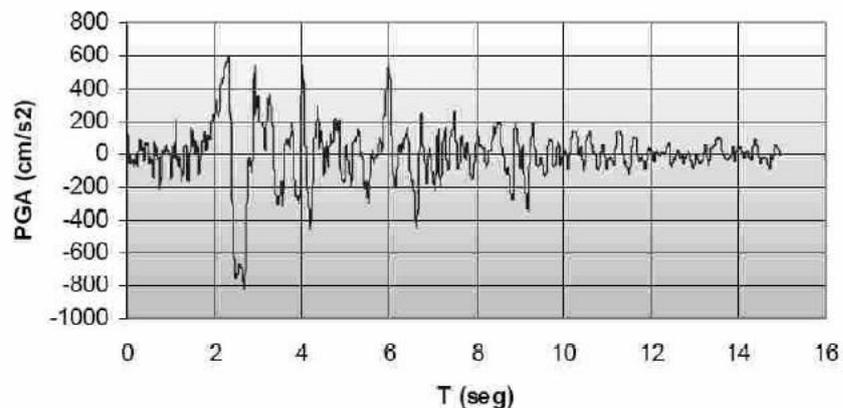
A nivel mundial, se han registrado sismos impulsivos, de los más significativos en los cuales se tiene registros, son: Loma Prieta EEUU (1989), con una duración de 15 segundos, entre 12 y 13 segundos contiene un pulso de aceleración de 0.4g que se sostiene por 0.8 segundos con una magnitud de 6.9 y una profundidad focal de 18 km, en la figura 1., se aprecian los registros sísmicos (NIST special publication 778). El sismo mato a 63 personas y más de 3000 heridos, dejando entre 8000 y 12000 personas sin hogar, los daños ocasionados se estimó que fueron de ocho mil millones de dólares; en la figura 1 se presentan los registros de este sismo.

También en el terremoto de Northridge, EEUU (1994) entre 2 y 3 segundos tienen un pulso de 0.8g durante 0.5 segundos de duración con una magnitud de 6.7, y una profundidad focal entre 15 y 20 km, en la figura 2., se aprecian los registros sísmicos (NIST special publication 862).

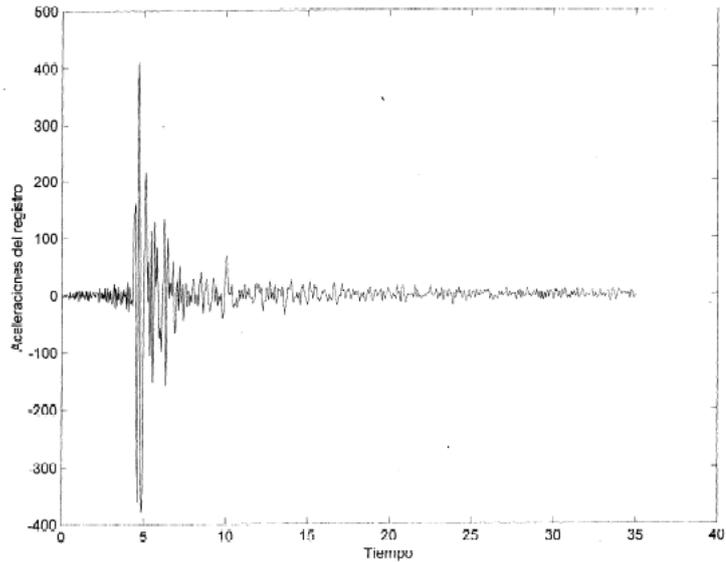
Los grandes terremotos del oeste argentino se han caracterizado por estar asociados a fallas activas que se encuentran próximas a importantes centros urbanos. La sismicidad está relacionada con terremotos superficiales interplaca o corticales que dan origen a sismos tipo impulsivos o de fuente cercana como los registrados para el terremoto de Mendoza de 1985 figura 3., y San Juan 1977. Las características impulsivas de este tipo de terremotos induce una respuesta sustancialmente diferente de la impuesta por terremotos con epicentro lejano.



**Figura 1** Acelerograma (Loma Prieta EEUU), 17 octubre 1989.



**Figura 2** Acelerograma (Northridge EEUU), enero 1984.

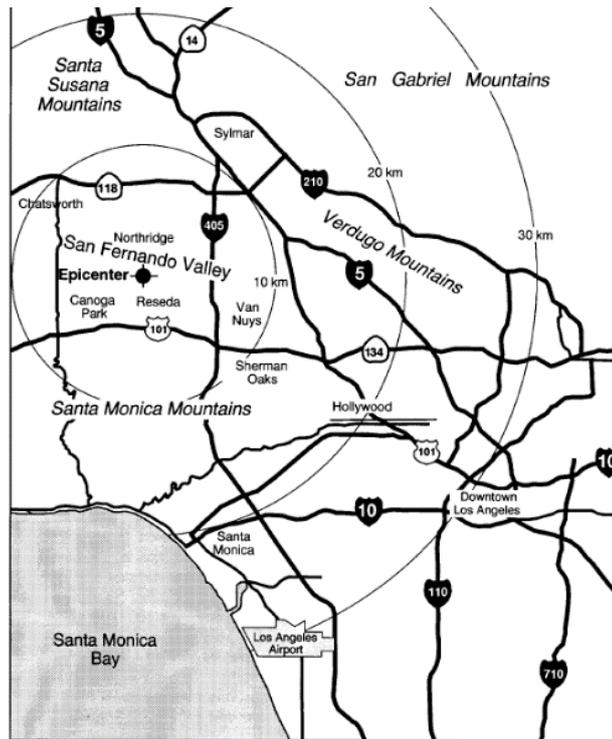


**Figura 3** Acelerograma (Mendoza Argentina), 26 de enero de 1985.

El 17 de enero de 1994, a las 04:31, hora del Pacífico en el distrito de Reseda, en un barrio de Los Angeles, California, se produjo el terremoto de Northridge con una duración de 15 segundos aproximadamente. El terremoto tuvo magnitud 6,7 Mw en la escala de Richter, pero la aceleración del suelo fue uno de los más altos jamás registrados instrumentalmente en una zona urbana en América del Norte, que mide 1,8 g con un fuerte movimiento del suelo se sentía tan lejanos como Las Vegas, Nevada, a unos 220 millas del epicentro. (NIST Special Publication 862)

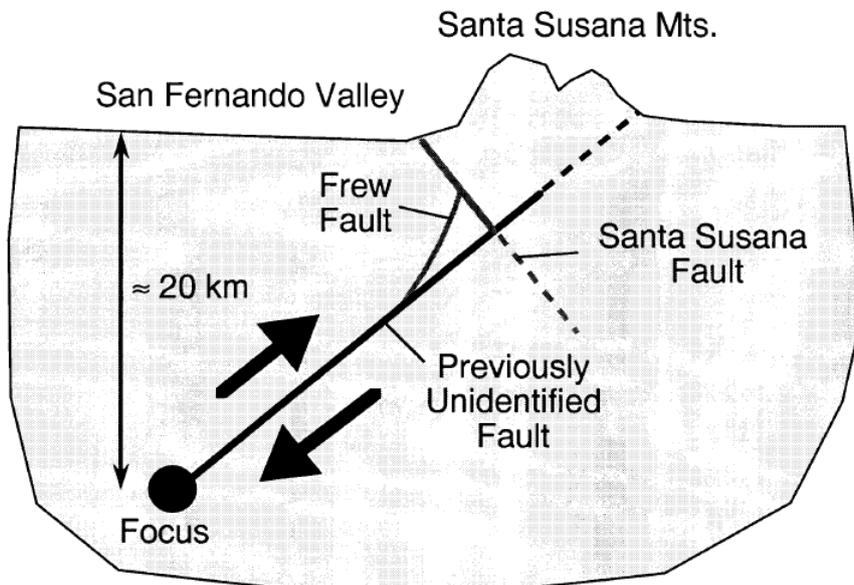
El epicentro se produjo en el valle de San Fernando (figura 4) a unos 30 kilómetros al noroeste del centro de Los Angeles en la comunidad de Northridge. En las coordenadas 34°.12' N y 118°.32' E, la profundidad focal se estima entre los 15 y 20 km. (fig.4)

La velocidad máxima del terreno en este terremoto en la estación receptora Rinaldi fue de 183 cm/s, la velocidad máxima del suelo más rápido jamás registrado. Además, se produjeron dos réplicas de 6,0 Mw. La primera alrededor de 1 minuto después del evento inicial y los segundos aproximadamente 11 horas más tarde, el más fuerte de varios miles de réplicas en todo. La cifra de muertos llegó a un total de 51 personas y hubo más de 7000 heridos. Además, el terremoto causó un estimado de \$ 20 mil millones en daños, por lo que es uno de los desastres naturales más costosos en la historia de EE.UU.(IRIS consortium).



**Figura 4** Epicentro del terremoto de Northridge

A pesar de la proximidad del área de la falla de San Andreas, el terremoto de Northridge no se produjo a lo largo de esta falla, sino más bien en una falla no identificada, que no había sido descubierta, porque no había ninguna ruptura superficial clara, y definir una falla específica no pudo ser posible. Sin embargo, los registros del sismo y las réplicas indican que la ruptura tuvo un mecanismo focal de empuje,  $10^\circ$  de norte-oeste y se hundió de  $30^\circ$  a  $45^\circ$  al Sur (fig. 5, Fig. 6.). Lo que nos puede decir que la falla ciega es inversa, las fallas cercanas conocidas son la falla Frew y la falla Santa Susana.



Source: EERC 1994

**Figura 5** El sismo ocurrió en una falla no definida. Cerca de las fallas Frew y Santa Susana.

Se produjo daño hasta 85 kilómetros de distancia, con la mayoría de los daños en el oeste del Valle de San Fernando, y las ciudades de Santa Monica, Simi Valley y Santa Clarita. El daño también fue causado por el fuego y deslizamientos de tierra. El terremoto de Northridge fue notable por golpear casi exactamente la misma área que el MW 6.6 Terremoto de San Fernando.

Entre otros efectos que produjo el sismo estuvieron la rotura de las uniones de estructuras de marco de acero, en paredes internas y externas, por lo que las reparaciones fueron difíciles y costosas. El compromiso las estructuras generó dudas sobre la seguridad de estos sistemas de construcción, adicionalmente se tuvo efectos secundarios como deslizamientos y avalanchas.

Otro factor coadyuvante fue la presencia de sedimentos suave sobre una base de rocas cristalinas, dichos sedimentos contenían agua, por lo que amplificaron las ondas sísmicas. El terremoto produjo inusualmente fuertes aceleraciones del orden de 1,0 g. de estas ondas de baja frecuencia pero con mucha energía, se orientaban en una misma dirección, lo que causó también la amplificación de las mismas por los sedimentos.

El terremoto de Northridge destruyó estructuras y cobró vidas humanas, pero también ayudó a crear montañas. Durante el terremoto hubo un desplazamiento de 3 metros a lo largo de la falla que sufrió una rotura de 18 Km de profundidad en la tierra. En la superficie, la montaña de Santa Susana se elevó 70 centímetros y se movió instantáneamente hacia el noreste unos 21 centímetros. (IRIS consortium).

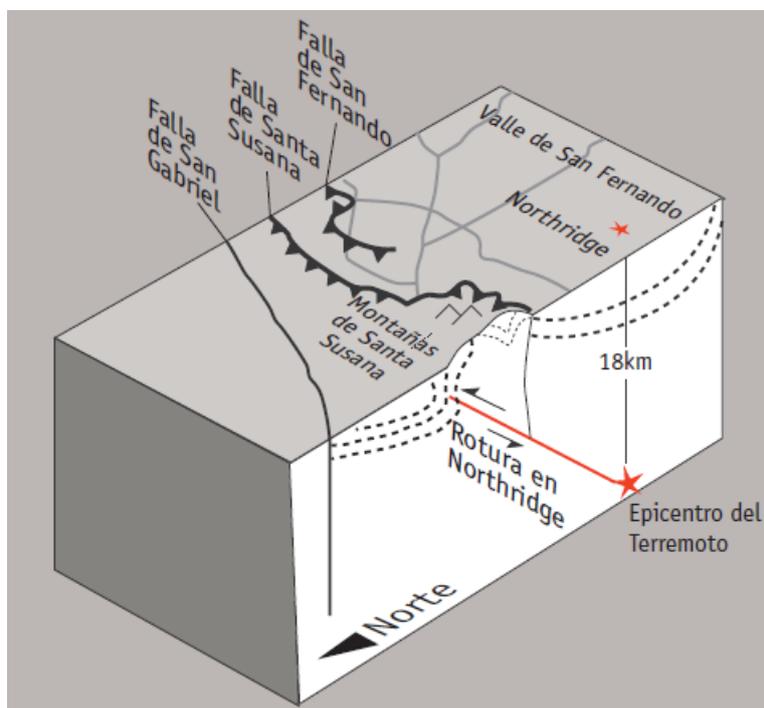


Figura 6 Rotura en el terremoto de Northridge.

## 2) FORMA DE CÁLCULO DE LOS FACTORES DE CERCANÍA

La directividad de las ondas sísmicas, ha sido motivo de estudio para varios investigadores en los últimos años, deseando así conocer cómo se mayor al espectro de diseño elástico por la directividad de ondas sísmicas, más aun cuando las fallas geológicas están asentadas sobre ciudades o cercanas a ellas, estas fallas geológicas ante un sismo pueden presentar importantes pulsos de energía causando grandes pérdidas de vidas humanas y grandes daños estructurales.

Sabiendo que la ciudad de Quito está asentada sobre fallas ciegas nos vemos en la necesidad de conocer como la directividad de ondas sísmicas mayor el espectro de diseño.

Para encontrar estos factores se aplicó la Metodología de Spudich y Chiou (2008) y se utilizó a ley de atenuación de Boore y Atkinson

Spudich y Chiou (2008) proponen como primer paso en su metodología la determinación del factor  $f_D$  ecuación 1.

$$f_D = f_R \times f_M \times (a + b \times IDP) \quad 1)$$

Donde  $f_R, f_M$  son factores que es función de la distancia y la magnitud respectivamente;  $a, b$  son coeficientes que han sido determinados por regresión lineal para diferentes modelos de atenuación del movimiento del suelo, en este caso corresponde a los propuestos por Spudich y Chiou (2009), para el modelo de atenuación de Boore y Atkinson; **IDP** (Isochrone Directivity Predictor) es un factor de la directividad de las ondas sísmicas desde el hipocentro hasta un determinado punto de interés.

Las funciones  $f_R, f_M$  se evalúan con las ecuaciones 2 y 3 respectivamente.

$$f_R = \max \left[ 0, \left( 1 - \frac{\max(0, R_{RUP} - 40)}{30} \right) \right] \quad 2)$$

$$f_M = \max \left[ 1, \left( \frac{\max(0, M - 5.6)}{0.4} \right) \right] \quad 3)$$

Donde  $R_{RUP}$  es la menor distancia desde el sitio de interés al área de ruptura, expresada en km, con este valor podemos determinar  $f_R$  mediante las siguientes condiciones:

Si  $0 < R_{RUP} < 40 \text{ km}$  el valor de  $f_R$  vale la unidad.

En cambio si el valor de  $R_{RUP} > 70 \text{ km}$ , el valor de  $f_R = 0$ . Por lo tanto si el sitio de interés se encuentra a más de 70 km., del área de ruptura no es importante el efecto de directividad y si el sitio de interés está a menos de 40 km., del área de ruptura si debe considerarse este efecto.

En la ecuación 3,  $M$  es la magnitud del evento. Si la magnitud es menor a 5.6, el valor de  $f_M = 1$ . Para magnitudes mayores que 6,  $f_M$  tendrá valores mayores a 1.

Finalmente el factor  $IDP$  se encuentra de la siguiente forma:

$$IDP = C \times S \times R_{ri} \quad 4)$$

$$C = \frac{\min(\tilde{c}, 2,45) - 0,8}{(2,45 - 0,8)} \quad 5)$$

$$S = \ln[\min(75, \max(s, h))] \quad 6)$$

$$R_{ri} = \max \left[ \sqrt{R_u^2 + R_t^2}, \varepsilon \right] \quad 7)$$

$$\tilde{c} = \left( \frac{\beta}{V_r} - \frac{R_{HYP} - R_{RUP}}{D} \right)^{-1} \quad 8)$$

Dónde:  $\beta$  es la velocidad de las ondas de corte:  $V_r$ , es la velocidad de ruptura del área de falla:  $R_{HYP}$  es la distancia al foco desde el sitio de interés:  $\varepsilon = 0,2$ :  $R_u, R_t$ , son factores por patrones de radiación desde el hipocentro al sitio de interés, estos se obtienen al medir en dirección paralela ( $R_u$ ) y normal ( $R_t$ ) a la traza de la falla. Los demás factores se explican en la figura 7.

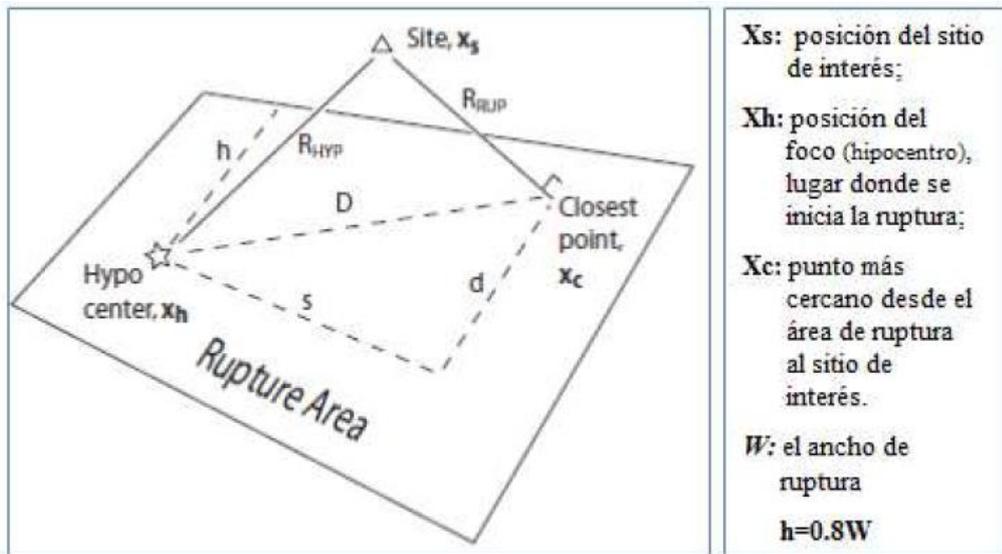


Figura 7: Sitio hipocentro y área de ruptura.(Aguiar 2013)

Con el propósito de entender mejor el significado de las variables; en la figura 8. Se indica en el plano horizontal un sector de la ciudad de Quito, vista de Sur hacia el Norte. El plano inclinado corresponde a una parte del sistema inverso de las fallas ciegas de Quito, este plano inclinado tiene un ángulo de  $40^\circ$  con respecto a la horizontal hacia el occidente lo que indica que la ciudad se encuentra en el Hanging Wall.

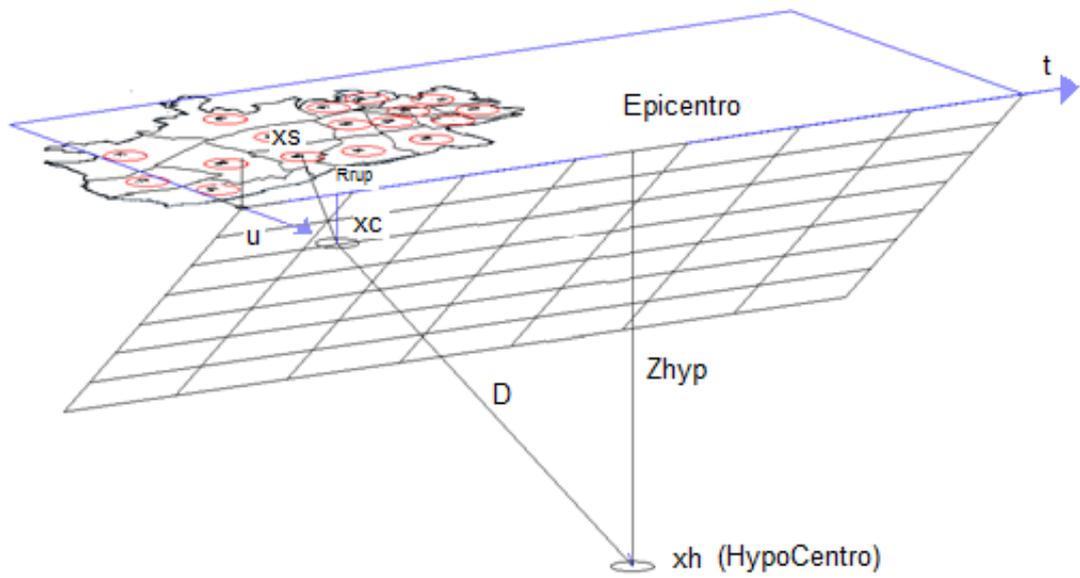


Figura 8: Sitio de Hipocentro y Área de Ruptura.

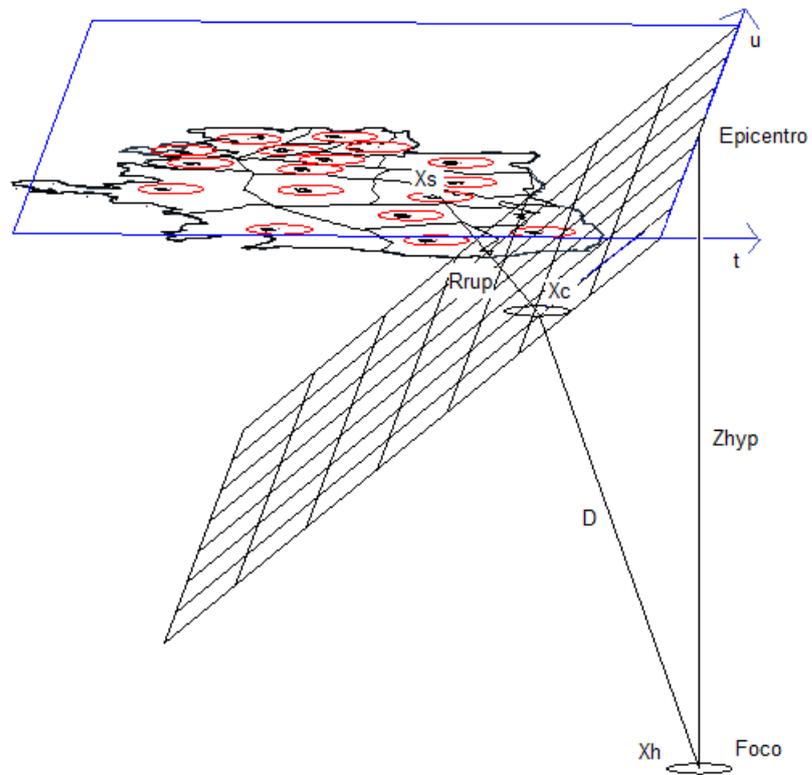


Figura 8: Sitio de Hipocentro y Área de Ruptura.

En la figura 8 se indica el  $R_{RUP}$  para un sitio específico en la ciudad de Quito, se lo define como la distancia más corta hacia el plano de falla, no siempre será la perpendicular. Al punto  $X_c$  se lo define como la intersección de  $R_{RUP}$  con el plano de falla. La longitud  $D$  es la distancia entre el punto del plano la falla considerada  $X_c$  y el Foco ( $X_h$ ), esta distancia se la puede hallar aplicando funciones trigonométricas.

Coordenadas del Punto  $X_c=(t_c, u_c, z_c)$

Coordenadas del punto  $X_h=(t_h, u_h, z_h)$

$$D = \sqrt{(t_c - t_h)^2 + (u_c - u_h)^2 + (z_c - z_h)^2} \quad 9)$$

Una vez que se determina el factor de directividad  $f_D$ , se encuentra el factor espectral  $f_E$ , mediante la siguiente ecuación.

$$f_E = \frac{1}{e^{f_D}} \quad 10)$$

Finalmente, el espectro de diseño que se ha obtenido para un determinado sitio, en el estudio de Peligrosidad Sísmica, se debe multiplicar por el factor  $f_E$ , para considerar el efecto de la directividad.

### 3) CÁLCULO DE LOS FACTORES DE CERCANÍA PARA ZONA NORTE DE QUITO.

Para determinar los factores de cercanía, se realizaron algunas hipótesis de ocurrencia de un sismo. Las fallas ciegas de Quito prestadas por Alexandra Alvarado, se presentan en la figura 9 hay que recalcar que las fallas se encuentran a una determinada profundidad de la superficie.

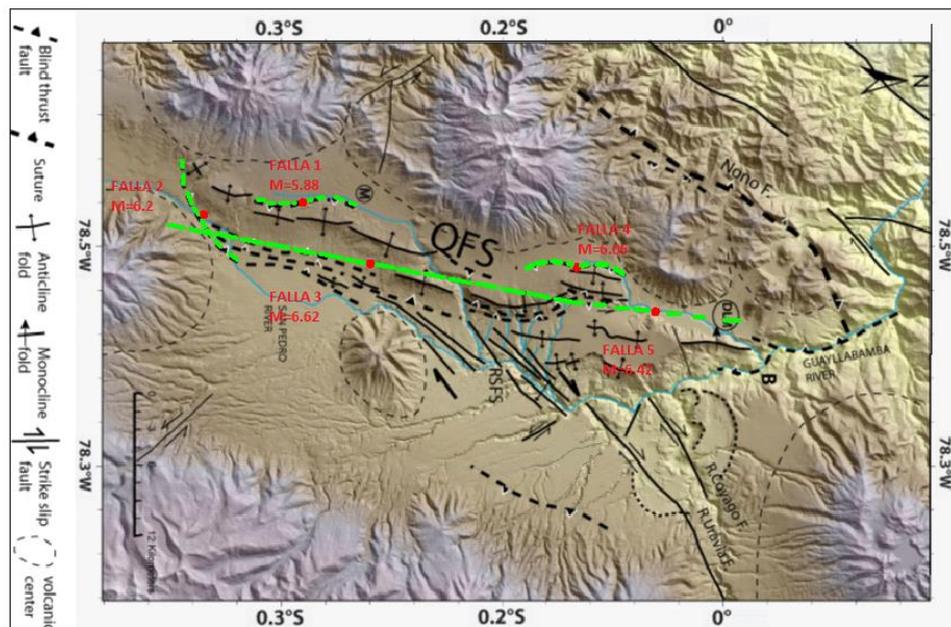
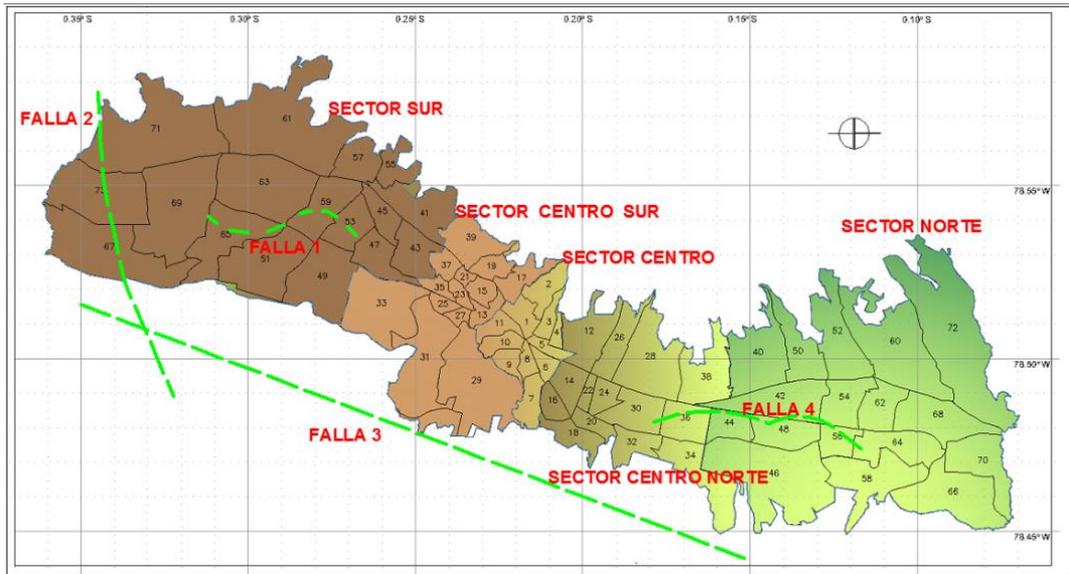


Figura 9 Fallas ciegas de Quito

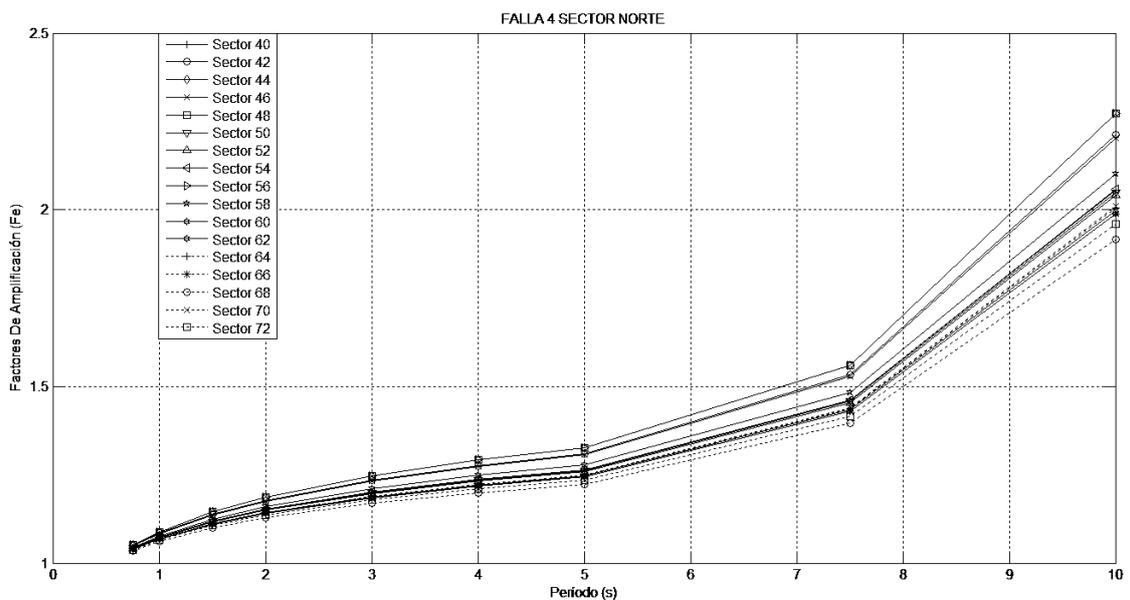
En la figura 10 se puede observar mejor la ubicación de las fallas en la ciudad de Quito, en el sector existe la falla 5 que se puede apreciar en la figura 9.



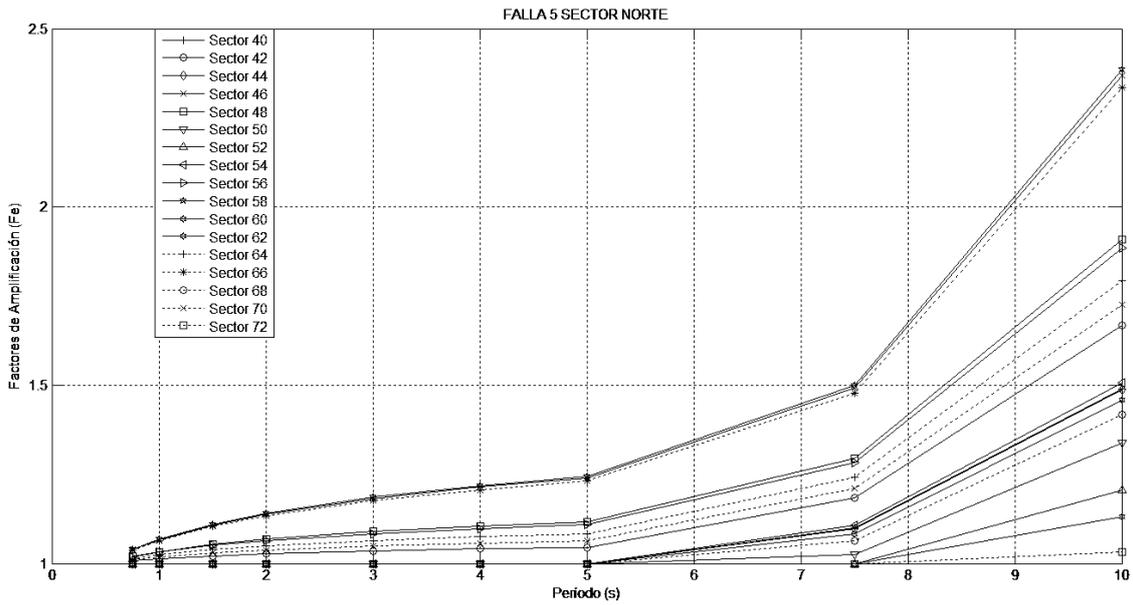
**Figura 10:** Hipótesis de las fallas ciegas para Quito.

Para el Sector Norte se consideró dos hipótesis, la primera ocurrencia de un sismo de magnitud 6.06 para la falla 4 y un ancho de falla de 5km, la segunda ocurrencia de un sismo de magnitud 6.41 para la falla 5 con un ancho de falla de 10 km, en ángulo de buzamiento de la falla es 40°

Se consideró un foco (hipocentro) a 10 km de la superficie, con estos datos se calculó los factores de amplificación (Fe) para el sector Norte. Los resultados obtenidos para las fallas 4,5 son presentados en las figuras.11.,12.

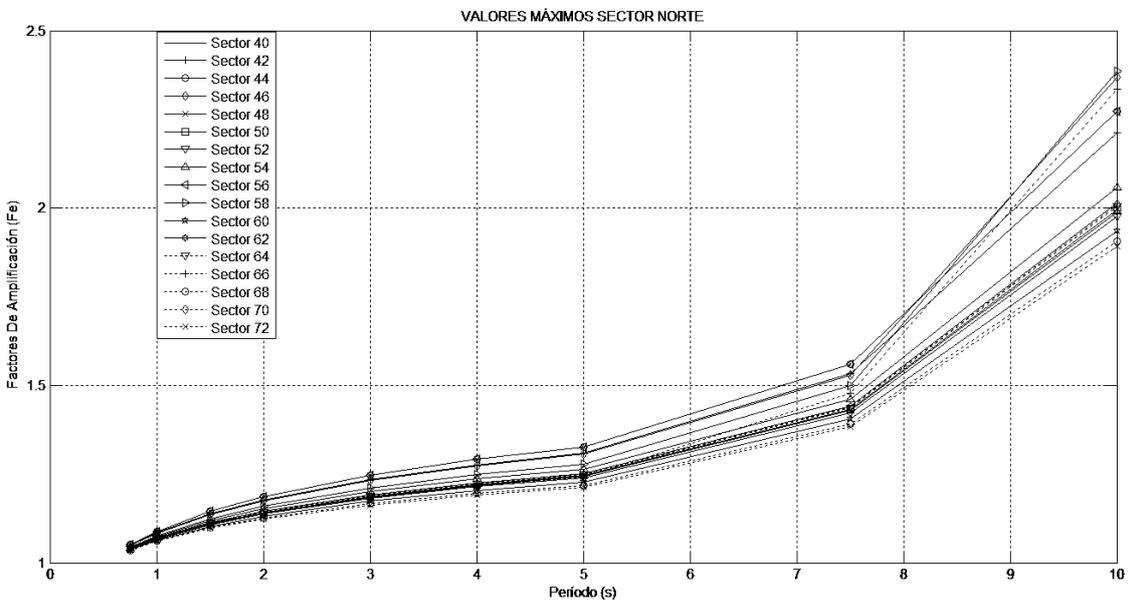


**Figura 11** Falla 4 Sector Norte



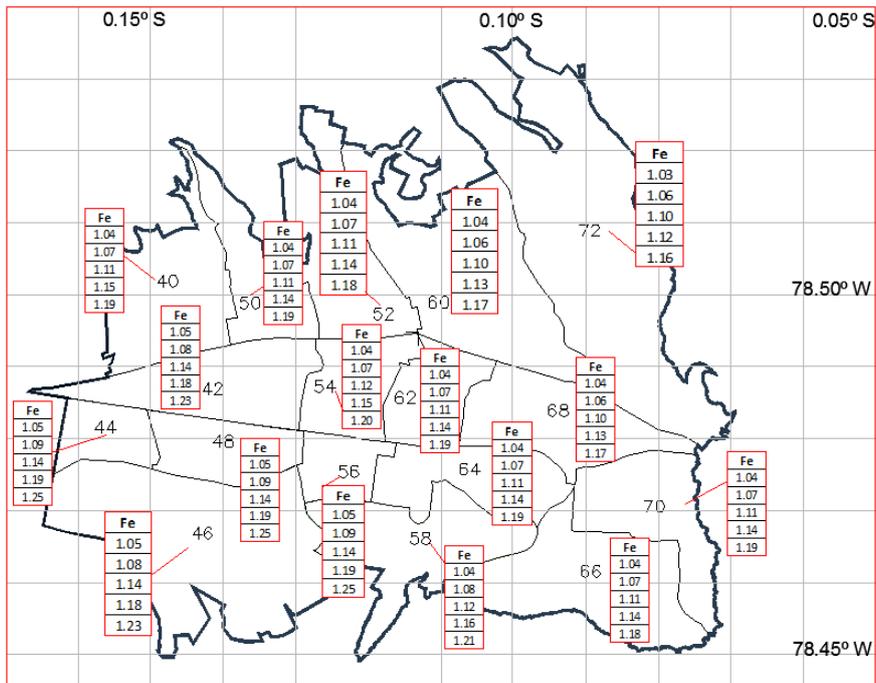
**Figura 12** Falla 5 Sector Norte

De estas dos hipótesis se obtuvieron los valores máximos presentados en la figura 13



**Figura 13** Valores Máximos el Espectro para el Sector Norte.

En la figura 14 se observa con claridad los factores de amplificación máximos para la zona Norte para los periodos de (0.75 - 1.0 - 1.5 - 2.0 -3 .0.)



**Figura 14** Factores de Amplificación Sector Norte

#### 4. ESPECTROS CON FACTORES DE CERCANÍA

Para observar la utilidad de los factores de cercanía, se ha obtenido espectros de diseño para dos barrios de la ciudad de Quito, y se ha comparado con los espectros obtenidos con factores de cercanía, obteniendo los resultados representados en las figuras 16., 17.

Teniendo en cuenta los datos para el barrio Kennedy en la tabla 1:

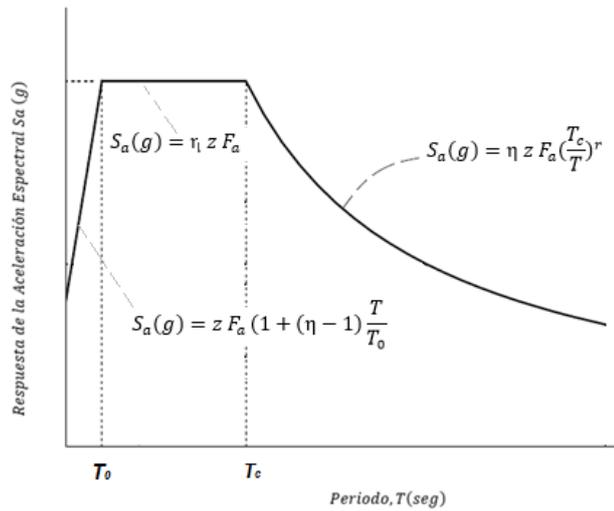
Tabla 1: Factores de Sitio y de Cercanía para el Barrio Kennedy

Barrio Kennedy			
Factores de Sitio		Factores de Cercanía	
Fa	0.78	Segundos	Factores
Fd	0.575	0.75	1.05
FS	0.915	1	1.09
		1.5	1.14
		2	1.19
		3	1.25
		4	1.29

Con los valores mostrados en la tabla 1 se procede a calcular el espectro con factores de cercanía, para esto usamos las ecuaciones del espectro inelástico propuestas por el grupo consultor (ERN 2012) figura 15, considero  $r = 1$ ,  $z = 0.4$  y  $\eta = 2.48$ , para la determinación de los factores de sitio. Los periodos  $T_0$ ,  $T_c$ , que definen las ramas del espectro se hallan con las ecuaciones 10,11:

$$T_0 = 0.1 F_s \frac{F_d}{F_a} \quad (10)$$

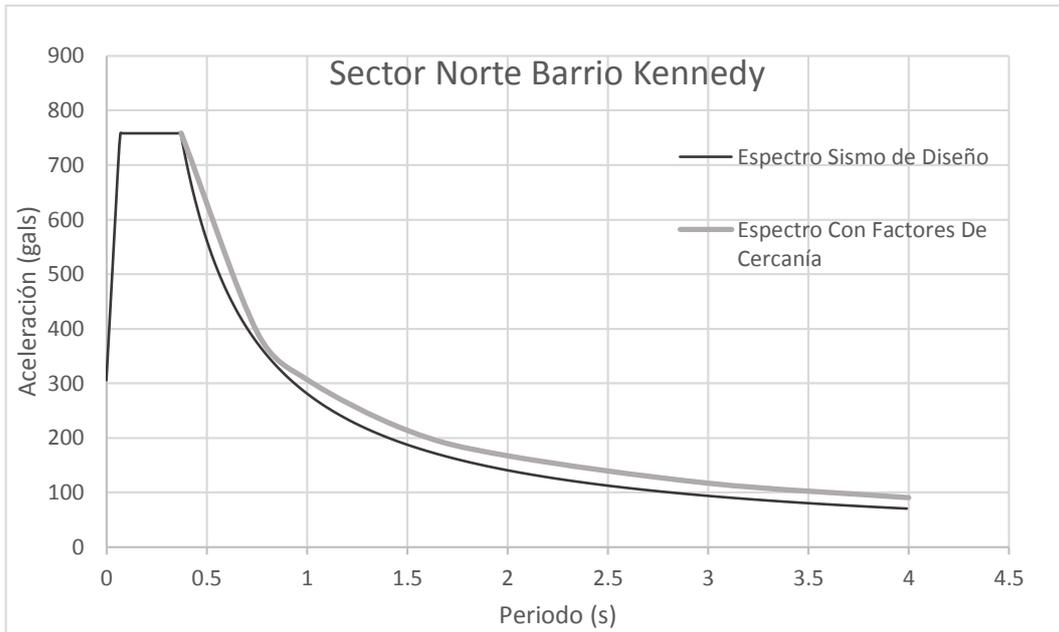
$$T_c = 0.55 F_s \frac{F_d}{F_a} \quad (11)$$



**Figura 15** Espectro inelástico NEC-11

Una vez calculado es espectro inelástico para el barrio Kennedy a la ecuación 12., que es la que rige el comportamiento del espectro después del tiempo  $T_c$ , se le multiplica por los factores de cercanía ( $f_E$ ) en los tiempos determinados, obteniendo los resultados obtenidos en la figura 16.

$$S_a(g) = \eta z F_a (\frac{T_c}{T})^r * f_E \quad T > T_c \quad (12)$$

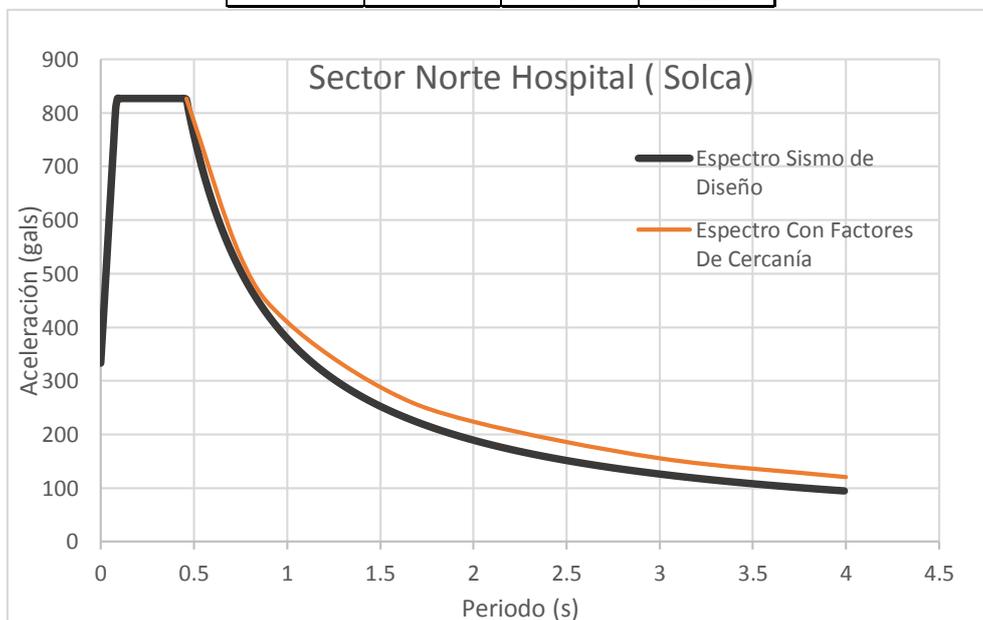


**Figura 16** Espectros de diseño con y sin Factores de Cercanía Barrio Kennedy (Norte).

En la Tabla 2 se observar los datos para poder determinar el espectro inelástico con factores de cercanía para el sector del hospital de solca, en la figura17 se muestra los resultados.

Tabla 2 Factores de Sitio y de Cercanía para sector del Hospital Solca

Sector Hospital Solca			
Factores de Sitio		Factores de Cercanía	
Fa	0.85	Segundos	Factor
Fd	0.775	0.75	1.05
FS	0.915	1	1.08
		1.5	1.14
		2	1.18
		3	1.23
		4	1.27



**Figura17:**Espectros de diseño con y sin Factores de Cercanía Hospital solca.

## 1. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

A lo largo de la historia hemos observado que los sismos impulsivos han tenido un gran poder destructivo a pesar que son de corta duración, la energía que descargan sobre las estructuras provoca un gran daño en las mismas y como resultado grandes pérdidas humanas, materiales y económicas.

En este estudio se ha analizado las fallas ciegas que se encuentran en la ciudad de Quito obteniendo factores de amplificación por cercanía a dichas fallas. Analizando las distintas fallas que cruzan la ciudad se encontró los valores máximos para las distintas zonas de Quito. Estos factores amplifican el espectro de diseño elástico y con ellos se tiene una mayor seguridad sísmica, evitando de esta manera probables pérdidas de vidas humanas y económicas que pueden darse en un sismo asociado al sistema de fallas de Quito.

## REFERENCIAS

1. Aguiar R., Sangurima K., Carlor Fraud., Quishpe M., Quishpe D., Cuiacal S., Chunga k., (2013) "MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE QUITO" Investigación Científica Desde las Aulas. Escuela Politécnica del ejército Quito. Pag. 39
2. Spudich P., Chiou J., (2008) "Directivity in NGA Earthquake Ground Motions: Analysis Using Isochrone Theory".
3. Nakashima M., Bruneau M., (1995) "Preliminary Reconnaissance Report go the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake" (Universidad California), Pag. 256
4. Uniform building code (1997) "Structural Design Requirements" chapter 16.
5. Spudich, P., Chiou, B. S-J., Graves, R., Collins, N., and Somerville, P. G., (2004.) A formulation of directivity for earthquake sources using isochrone theory, U.S. Geological Survey Open File Report 2004-1268, available at <http://pubs.usgs.gov/of/2004/1268/>.
6. Fraud C., Saragoni R., " Características de la Respuesta Sísmica a Terremotos de Campo Cercano o Tipo Pulso"
7. <http://www.estructuras.info/recursos/publicaciones/sismo%20de%20Kobe.pdf>
8. Costa C., "Neotectónica de fallas inversas y plegamiento asociado" <http://geoestructural.unsl.edu.ar/Neotectonica/042Compresion.pdf>
9. Guillen M. " Sismo de 17 enero de 1995 kobe-Japón" <http://www.estructuras.info/recursos/publicaciones/sismo%20de%20Kobe.pdf>
10. NIST special publication 778 "Performance of Structures During the Loma Prieta Earthquake of October 17, 1989" Pag. 212
11. NIST special publication 862 "1994 Northridge Earthquake Performance of Structures, Lifelines, and Fire Protection System" Pag. 180
12. NIST special publication 901 "The January 17, 1995 Hyogoken-Nambu (Kobe) Earthquake)" Pag. 576
13. <http://www.iris.edu/hq/files/ExploreEarthSp.pdf>