REGISTROS ACELEROGRÁFICOS OBTENIDOS DURANTE EL TERREMOTO DE CINCHONA DEL 8 DE ENERO DE 2009, COSTA RICA

Alvaro Climent¹ & Cesar Aaron Moya²

RESUMEN

Durante este evento sísmico, las estaciones acelerográficas del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) como las del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) del Instituto de Investigaciones en Ingeniería (INII) de la Universidad de Costa Rica registraron aceleraciones horizontales pico que van desde 2,9 a 658 cm/s² obtenidas a 68 y 14,4 km con respecto al epicentro, respectivamente. Se incluye en este estudio el dato de la sacudida sísmica registrado en 21 estaciones, de las cuales 17 se encuentran localizadas en sitios clasificados como suelo.

El análisis de la información indica una focalización de la energía del sismo en la dirección norte-sur y una rápida atenuación en la dirección este-oeste. Se nota un efecto de sitio importante (amplificación) en la estación SSAB del LIS, ubicada en La Sabana.

Los espectros elásticos de respuesta calculados utilizando las señales sísmicas registradas en cada una de las estaciones incluidas en este estudio, muestran una muy buena concordancia, en su forma espectral, con el espectro normalizado (FED) recomendado por el Código Sísmico de Costa Rica (CSCR 2002).

El acelerograma de campo cercano obtenido por el ICE en la estación ICBM a 15 km del epicentro, registro aceleraciones horizontales pico superiores a los 600 cm/s², calculándosele una velocidad pico de 23,5 cm/s, una Intensidad de Arias de 2,4 m/s, y una duración significativa del movimiento fuerte de 8,2 s, lo que indica que en ese sitio y alrededores la sacudida sísmica fue muy fuerte, con un alto potencial de generar daños. Esta condición propia de la sacudida sísmica en la zona epicentral se vio potenciada en sus efectos debido a las condiciones propias de la región de ocurrencia del evento, con la presencia de altas pendientes y espesores importantes de suelos volcánicos susceptibles a los deslizamientos, al igual que una buena cantidad de edificaciones con deficiencias de diseño y construcción antisísmica.

ABSTRACT

During this seismic event, the accelerograph stations of the Costa Rican Electricity Institute (ICE) as well as those of the Engineering Research Institute (LIS) of the University of Costa Rica recorded horizontal peak ground accelerations ranging from 2.9 to 658 cm/s² obtained 68 and 14.4 km from to the epicenter, respectively. Is included in this study the data of the seismic shaking recorded at 21 stations, of which 17 are located in sites classified as soil.

¹ Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), San José Costa Rica; correo-e: acliment@ice.go.cr

² Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS: IINI-UCR), San José, Costa Rica; correo-e: aaronm@iini.ucr.ac.cr

The analysis of the strong motion data indicates an earthquake energy focalization in north-south direction and a rapid attenuation in the east-west direction. It was note an important site effect (amplification) at the SSAB station (LIS), located in La Sabana.

The elastic response spectra calculated using the accelerograms (seismic signals) recorded in each of the stations included in this study, show a very good fit, in its spectral shape, with the normalized response spectrum (FED) recommended by the Seismic Code of Costa Rica (CSCR 2002).

The near field accelerogram obtained at ICBM station (ICE), 15 km from the epicenter, recorded horizontal peak ground accelerations above the 600 cm/s², peak velocity of 23.5 cm/s, Arias Intensity of 2.4 cm/s, and a significant duration of 8.2 seconds during the strong motion, which indicates a high potential to generate damage of this seismic event, and that was powered in its effects due to the conditions of the region where the event occurred, with the presence of high slopes and thicknesses of volcanic soils susceptible to landslides, like a good number of buildings with deficiencies in its design and construction practices against earthquakes.

INTRODUCCIÓN

El terremoto de Cinchona, ocurrido el pasado 8 de enero de 2009 (M_w 6,2), es un evento sísmico característico del arco volcánico de Costa Rica, con magnitud intermedia (5,5 < M_w < 6,5) y foco superficial (Prof. < 10 km), pero que debido a su cercanía de ocurrencia con centros de población e infraestructura importante, generan gran cantidad de daños y pérdidas, tanto económicas como en vidas humanas. Durante la ocurrencia de éste evento y días posteriores fueron reportados 23 muertos, 7 personas pérdidas, 100 heridas, una área afectada de 550 km², 125 000 personas afectadas, de las cuales 1523 debieron ser llevadas a alberges temporales. También 13 puentes fueron dañados, así como 1087 viviendas, de las cuales 427 sufrieron daño total [9]. Además de los daños en las viviendas y la afectación directa en la actividad agropecuaria de la región, éste evento causo graves efectos secundarios debido a los deslizamientos y la falla de los suelos, en zonas de altas pendientes con espesores de suelo importantes de origen volcánico saturados e inestables. Uno de los principales daños para la actividad socio-económica de la región fue la interrupción de la carreta que comunica los poblados de Varablanca con San Miguel de Sarapiquí, problemática que no ha sido solucionada en su totalidad, al momento de escribir este documento, debido a la presencia de extensas zonas inestables y la posible generación de nuevos deslizamientos, especialmente durante la época lluviosa. Además de los efectos anteriores, la infraestructura vital del Sector Eléctrico del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) se vio fuertemente afectada, en especial la casa de máquinas de la planta hidroeléctrica Cariblanco, debido al impacto directo a una gran avalancha de lodo, así como la línea de transmisión de alta tensión, debido a la gran cantidad de deslizamientos cerca de las torres y que ameritan un nuevo trazado de la misma.

Debido a la presencia de varios proyectos de generación eléctrica en la zona donde ocurrió el terremoto, el ICE había desarrollado una serie de campañas de monitoreo sismológico y de estudios de amenaza sísmica, por lo que se tenía el conocimiento claro de la existencia de importante fallamiento activo y sismicidad histórica, inclusive esperándose la ocurrencia de un evento con características similares al que se presentó, durante la vida útil de las obras de los proyectos [2] [4] [6] [7]. Específicamente en la zona donde ocurrió el evento del 8 de enero, se tiene el reporte [1] de la ocurrencia de 5 eventos sísmicos históricos importantes que también causaron daños, y que ocurrieron en los años 1851 (M_s 6,0), 1888 (M_s 6,0), 1911 (M_s 5,8), 1912 (M_s 5,1) y 1955 (M_s 5,5)(ver Fig. 1).

Entre otros eventos importantes que han ocurrido en el arco volcánico y que han causado daños, están los terremotos de Cartago de 1910 (M_w 6,4), de Patillos de 1952 (M_w 6,2), de Pérez Zeledón de 1983 (M_w 6,2) de Piedras Negras de 1990 (M_w 5,9) y el de Turrialba de 1993 (M_w 6,0).

Durante este último evento sísmico importante del arco volcánico (Terremoto de Cinchona), las estaciones acelerográficas del ICE y las del LIS registraron una buena cantidad de acelerogramas producidos por la sacudida sísmica del terreno, tanto en campo libre como en alguna obra civil en particular. La combinación de los registros de ambas redes acelerógraficas, permitieron obtener información a diferentes distancias (incluyendo campo cercano), diferente orientación con respecto al epicentro y diferentes condiciones de sitio (suelo, roca, suelo firme).

En este documento se presenta un resumen de los resultados obtenidos del procesamiento y análisis de los acelerogramas registrados, así como su comparación con valores estimados utilizando ecuaciones de atenuación empíricas desarrolladas para el país. También se presenta una comparación de los espectros de respuesta obtenidos con las señales sísmicas instrumentales y el espectro recomendado por el Código Sísmico de Costa Rica 2002 [10].

INFORMACIÓN SISMOLÓGICA DEL EVENTO

La Red Sismológica Nacional (RSN: ICE-UCR) reportó que el terremoto tuvo una magnitud $M_{\rm w}$ de 6,2, una profundidad de 4,6 km, una intensidad máxima Mercalli Modificada entre VIII y IX en la zona mesosísmica (Cinchona), un área de ruptura de 72 km² y que está asociado con un sistema de fallamiento con rumbo NW-SE ubicado en el flanco este del volcán Poás, denominado Angel-Varablanca [3]. Previó a la ocurrencia del evento principal, el día 7 de enero a las 10 de la mañana, se produjo un precursor de magnitud $M_{\rm d}$ 4,6 (magnitud con base en la duración de la señal sísmica), localizándose cerca de la localidad de Varablanca. En la figura 1 se presenta una mapa con la ubicación del epicentro del evento principal, las réplicas registradas por las estaciones sismológicas de la RSN, y las principales fallas en la región donde ocurrió el terremoto, entre las cuales destacan la Angel-Varablanca, San Miguel, Volcán Viejo-Aguas Zarcas y Carbonera.

La ocurrencia de este evento produjo, tanto sismos precursores como réplicas, reportando la RSN la ocurrencia de 40 eventos precursores antes del evento principal y 272 eventos réplica hasta el día 11 de enero, con magnitudes entre 2,5 y 4,4 (M_d). A partir de ese día, además de los eventos réplica ocurriendo en la falla Angel-Varablanca se presentaron otros eventos ocurriendo en zonas y fallas vecinas, como reflejo del desequilibrio y acomodo de esfuerzos debido al sismo ocurrido (ver Fig. 1).

REGISTROS ACELEROGRAFICOS

Aunque en el país funcionaron en forma intermitente instrumento de registro de los movimientos sísmicos fuertes (acelerógrafos) desde 1944 [8], no es sino hasta 1984 en que estos han venido operando en forma ininterrumpida, tanto en el ICE como en el LIS, como complemento a las redes de estaciones sismológicas. Inicialmente se empezó con instrumentación analógica, la cual fue sufriendo modificaciones y mejoras debido a los cambios tecnológicos, hasta llegar a los acelerógrafos digitales actuales, cuya operación ha sido automatizada y controlada por medio de la internet. Los acelerógrafos son instrumentos que registran en el tiempo la historia de aceleración (sacudida sísmica) que experimenta el sitio donde ha sido instalado el instrumento (campo libre, edificio, etc.), y permiten cuantificar en un parámetro de uso ingenieril (aceleración de la gravedad g) la severidad de la sacudida sísmica en esos sitios, debido a la ocurrencia de un evento sísmico particular, como el del pasado 8 de enero. Estos instrumentos registran el movimiento sísmico en tres componentes, dos horizontales y una vertical.

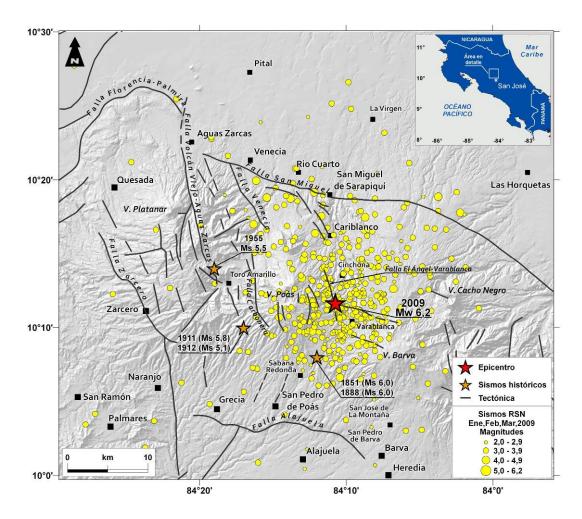


Fig. 1. Localización epicentral del terremoto del 8 de enero 2009, principales sismos históricos, epicentros de réplicas y principales fallas en la región (tomado de Barquero, 2009).

En la figura 2 se muestra un mapa a nivel nacional de la distribución de la mayoría de las estaciones acelerográficas que operan en la actualidad en el país, tanto del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) como del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) adscrito al Instituto de Investigaciones en Ingeniería de la Universidad de Costa Rica. La combinación de los registros de ambas redes permitieron obtener información a diferentes distancias (incluyendo campo cercano) y diferentes condiciones de sitio (roca y suelo).

Las estaciones del ICE forman parte del Programa de Seguridad Sísmica de Presas y Sitios de Proyecto ICE, y son operadas y administradas por el Área de Amenazas y Auscultación Sismológica y Volcánica del C.S. Exploración Subterránea de la UEN PySA en conjunto con los Centros de Producción y Proyectos. Los acelerógrafos se ubican en la mayoría de las presas ya construidas y sitios de presa de proyectos en desarrollo y se utilizan acelerógrafos de las compañías Kinemetrics (Etna) y RefTek (130-SMA).

Las estaciones del LIS se encuentran en sitios poblados como cabeceras de provincias o cantones. Los acelerógrafos se encuentran en casetillas o instalaciones de una planta, por lo cual se podría considerar que están en campo libre. Al igual que el ICE se cuenta con instrumentos Kinemetrics (Etna, QDR) y

RefTek (130-SMA). El LIS también opera estaciones que pertenecen a la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE), dos de las cuales, RALT y RMOI, se muestran en el mapa de la figura 2.

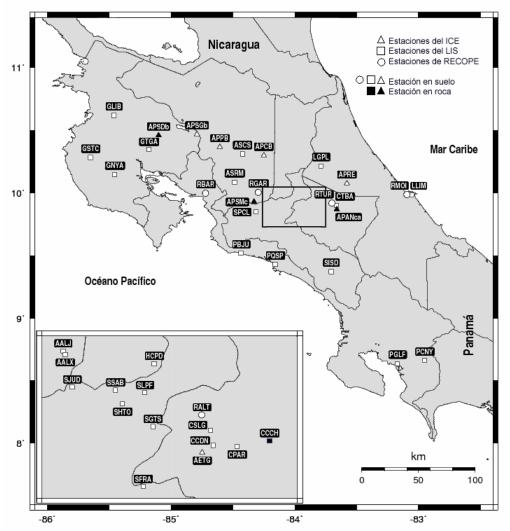


Fig. 2. Distribución de estaciones acelerográficas a nivel nacional del LIS e ICE. Los símbolos sólidos representan los sitios cimentados en roca, los abiertos en suelo.

El mapa de la figura 3 nuestra la distribución espacial de las estaciones acelerográficas en las cuales se obtuvo registro sísmico (acelerograma) y que están incluidas en este estudio. Se muestra también los valores de aceleración pico registrado en cada una de ellas en unidades gal (cm/s²), correspondientes a la componente horizontal mayor. Todas las estaciones usadas se encuentran localizadas en estructuras de un solo piso o en casetas en campo libre, y de acuerdo a la figura 3 muestran una buena distribución alrededor del epicentro hacia el este, sur y oeste, no así en la parte noreste donde no se cuenta con estaciones y por tanto no se obtuvieron registros del evento. Esta distribución de las estaciones permitió obtener información a diferentes distancias con respecto al epicentro, pero poca de ella en el campo cercano, estando en esta condición únicamente la estación APCB (ICBM) ubicada a 14, 4 km de distancia del hipocentro, y en la cual se registro un valor pico de 658 cm/s². Esta estación se ubica aproximadamente a 3,2 km al suroeste del poblado de Cariblanco (ver Fig. 1).

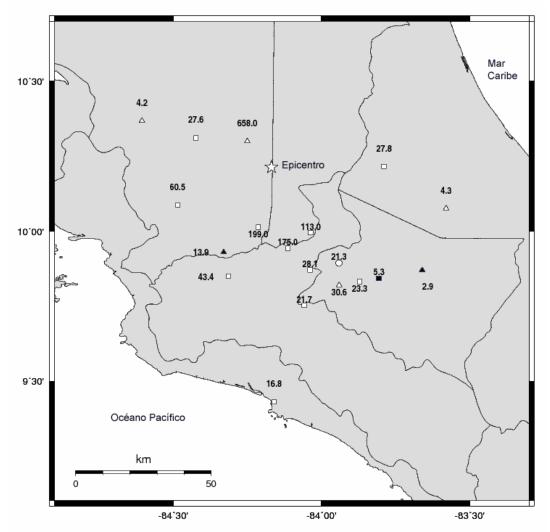


Fig. 3. Valores máximos de aceleración (cm/s²) horizontal registradas durante el sismo de Cinchona.

De acuerdo a la simbología del mapa de la figura 2, sobre la clasificación local de sitio de cada una de las estaciones, la mayoría de los registros sísmicos fueron obtenidos en estaciones clasificadas como suelo, ya sea firme o blando (85 %) y el resto en sitios clasificados como roca

En el cuadro 1 se presenta un resumen de los valores pico de aceleración obtenidos para cada una de las estaciones y para cada una de las tres componentes registradas, de acuerdo al procesamiento de los acelerogramas utilizando un filtro paso banda entre 0,1 y 25 Hz y corrigiéndolos por línea base. La estación de registro más cercana se ubicó a los 14,4 km y la más lejana a 120,4 km. El valor máximo registrado en la mayor de las componentes horizontales fue de 658 cm/s² y el mínimo de 2,7 cm/s², sin coincidir éste con la estación ubicada más lejos con respecto al epicentro del evento. En el cuadro 1 la columna de distancia, corresponde a la distancia entre cada una de las estaciones y el hipocentro del terremoto.

Estación	Distancia	Aceleración pico (cm/s²)		
	(km)	NS	EW	UD
ICBM	14,4	658,0	608,0	271,0
AALX	23,6	169,0	199,0	97,3
HCPD	28,8	113,0	58,1	36,9
ASCS	30,5	25,8	27,6	20,8
SSAB	31,2	140,0	175,0	49,2
APSM	35,6	13,9	9,5	8,2
ASRM	37,9	60,5	53,5	43,4
SGTS	41,0	26,4	28,1	11,5
LGPL	42,0	19,9	27,8	10,4
RALT*	43,7	21,3	21,0	13,4
SPCL	43,7	26,6	43,4	28,8
AETG	50,6	19,9	30,6	7,6
APPB	51,2	3,2	3,2	4,2
SFRA	52,7	18,5	21,7	10,8
CPAR	53,7	23,3	15,6	8,6
СССН	57,4	5,3	3,5	3,8
APPI	64,2	4,5	3,4	3,6
APRE	66,6	3,7	4,0	4,3
APAN	68,0	2,9	2,7	1,5
PQSP	86,9	14,7	16,8	10,1
RMOI*	120,4	4,4	4,8	3,1

Cuadro 1. Valores máximos de aceleración del terreno en cada una de las estaciones acelerográficas.

En las gráficas de la figura 4 se presentan a la misma escala las trazas de aceleración de las estaciones donde se registraron las valores mayores de aceleración, siendo ICBM, AALX, HCPD y SSAB dichas estaciones. En ellas se puede apreciar el efecto de atenuación de la amplitud y el filtrado de las altas frecuencias que sufren las señales sísmicas al propagarse por el medio.

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

El sismo tuvo una magnitud moderada y una profundidad bastante somera, por lo cual el área afectada más directamente fue la zona epicentral. El máximo valor de aceleración fue registrado por la estación ICBM del ICE y alcanzó un pico de 658cm/s². La estación se encontraba localizada a escasos 15 km del hipocentro hacia el noroeste. En la zona donde se obtuvo este registro de aceleración, la RSN estimo una IMM de grado VIII y de acuerdo a Wald et al. [14] y Linkimer [10], para este nivel de intensidad se esperaría que se presenten niveles de aceleración entre 335 y 638 cm/s², cuyo límite superior es bastante coincidente con el registrado por la estación ICBM. Normalmente el nivel de intensidad VIII está relacionado con una sacudida sísmica que es sentida en forma severa por las personas, y con un potencial de daños bastante alto, especialmente en aquellas construcciones con un bajo nivel de ingeniería. El acelerograma registrado por la estación ICBM, además de presentar la aceleración pico y la IMM ya indicadas, se le cálculo un velocidad pico del terreno de 23,5 cm/s, una Intensidad de Arias 2,4 m/s, y una duración significativa del movimiento fuerte de 8,2 s, lo que confirma la severidad de la sacudida sísmica de este evento en el área epicentral y cercanías y su alta capacidad de producir daños.

^{*} Estaciones pertenecientes a RECOPE.

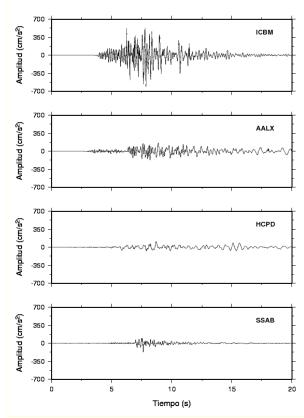


Fig.4. Registros tiempo-aceleración de la componente horizontal mayor, en las cuatro estaciones donde se registraron los valores de aceleración pico mayores, según Cuadro 1.

La distribución de los valores pico de aceleración (Fig. 3, Cuadro 1) indican que el sismo fue sentido fuertemente en San José, Alajuela y Heredia, todas estas ciudades ubicadas al sur del epicentro, mientras que en Cartago el sismo fue sentido en forma muy leve, con valores de aceleración del orden de 20 cm/s², al igual que al oeste del Valle Central, lo que hace suponer que la focalización de la energía tuvo una orientación norte-sur.

La distribución de los valores pico de aceleración de la figura 3, muestra un decaimiento (atenuación) normal de la señal sísmica con la distancia, lo que llevo a tener valores muy bajos de aceleración a distancias mayores a los 40 km con respecto al epicentro, con una excepción a esta condición en la estación SSAB. En la figura 5 se presenta un gráfico con la distribución de los valores de pico de aceleración instrumentales con respecto a la distancia hipocentral, para condición de suelo, en el cual se observa lo indicado anteriormente. Se incluye también en este gráfico, las curvas de atenuación estimadas, para un evento sísmico similar al de Cinchona, y obtenidas de utilizar las ecuaciones propuestas por Climent *et al.* [5] (CLI94) y Schmidt *et al.* [12] (SCH97) normalmente utilizadas en el país en los estudios de amenaza sísmica. Como se puede observar los datos observados presentan un decaimiento mayor con la distancia que los estimados por el valor medio de estas ecuaciones. Sin embargo hay que indicar que el número de estaciones disponibles, con dato de aceleración para este sismo, es relativamente bajo como para mostrar adecuadamente el patrón general de atenuación en el país. Otra consideración que se

puede agregar, es que los datos observados se distribuyen dentro de los limites de una o dos desviaciones estándar de las curvas estimadas (estos límites no están incluidos en la figura 5).

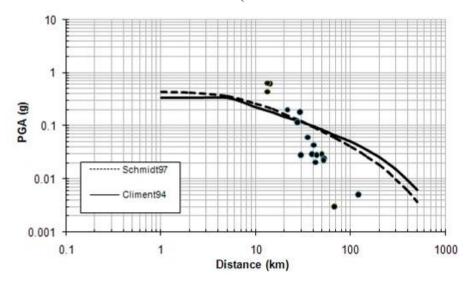


Fig. 5. Gráfica de valores de aceleración observados durante el terremoto de Cinchona, comparados con valores estimados utilizando las ecuaciones de atenuación CLI94 y SCH97, para un evento similar.

De comparar el valor pico aceleración (Fig. 6) de la componente vertical con respecto al valor de la horizontal (V/H), sin considerar la condición de sitio, de los registros obtenidos en todas las estaciones acelerográficas (Fig. 3, Cuadro 1), se observa un rango de variación bastante amplio (V/H = 0.3-1.2) de esta razón, pero que en general (promedio) se puede indicar que el valor pico de aceleración en la componente vertical es un 40 % menor al valor registrado en la componente horizontal, para este sismo en particular.

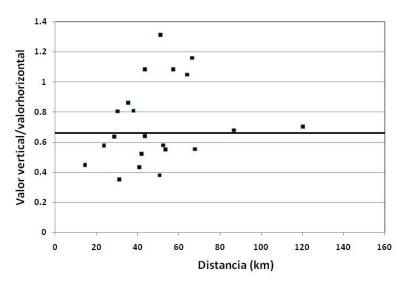


Fig. 6. Comparación del valor pico de aceleración de la componente vertical con respecto a la componente horizontal de la sacudida sísmica durante el Terremoto de Cinchona.

En la figura 7 se muestran los espectros elásticos de respuesta normalizados (FED) para el 5 % de amortiguamiento, para cada una de las estaciones donde se obtuvo registro sísmico, separadas de acuerdo a la condición de sitio, y comparadas con la forma espectral elástica del CSCR2002. De estas gráficas se puede observar una buena concordancia de las formas espectrales obtenidas con los registros acelerográficos y la recomendada por el código sísmico actual utilizado en el país. Observándose que la forma espectral del código en general se muestra como una envolvente de todas las respuestas y también mostrando un decaimiento bastante acorde con el mostrado por los registros instrumentales para los periodos mayores.

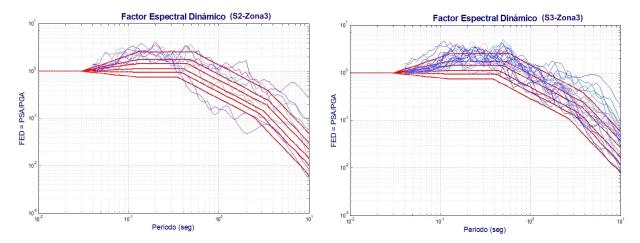


Fig. 7. Espectros normalizados de respuesta para el 5 % de amortiguamiento, comparados con la forma espectral del CSCR 2002, para sitios tipo S2 y S3 en Zona III.

En el trabajo de Microzonificación Sísmica de San José del año 2000 [13] se elaboró un mapa de materiales no consolidados en el área metropolitana (Fig. 8). De acuerdo a la información ahí contenida, en La Sabana existen depósitos de suelo blando de hasta 30 m de profundidad que, durante un terremoto, tenderían a amplificar la señal sísmica. Este comportamiento de amplificación en los sitios cercanos a La Sabana, ya había sido observado en la estación SECA, en ocasión del terremoto de Damas del 20 de noviembre del 2004 (M_w 6.4) y nuevamente se repite con el sismo de este año en la estación SSAB cerca del edificio principal del ICE. En efecto, aún cuando SSAB se encuentra a una distancia epicentral similar al de una estación en San Miguel de Santo Domingo de Heredia (HCPD), el valor de aceleración pico en SSAB es mayor al de HCPD. También, un estudio de la rotación de componentes horizontales en dirección radial y transversal al epicentro del evento del 8 de enero en SSAB y Alajuela (AALX) revela que los valores pico alcanzados en ambos sitios son comparables, estando la segunda estación más cerca del epicentro del evento.

En el mismo documento se estudiaron los efectos de sitio en varios puntos dentro de la capital. Los resultados indican que existe amplificación importante en la parte central, norte y noreste de San José principalmente, por lo cual el movimiento sísmico durante el sismo de Cinchona en esos sitios pudo haber sido particularmente fuerte.

Uno de los últimos eventos importantes en ocurrir cerca del área metropolitana fue el de Piedras Negras del 22 de diciembre de 1990. El evento tuvo una M_w 5.9 y profundidad de 15 km pero causó importantes daños en la ciudad de Alajuela. Resulta interesante comparar los valores pico de aceleración durante el evento de 1990 y el del 2009 porque son muy diferentes. En 1990 la aceleración alcanzó un valor de 415 cm/s² y esta vez fue poco menos de la mitad. Probablemente los efectos de propagación y de la fuente

hayan sido los factores más importantes en este comportamiento tan distinto para eventos que se encuentran casi equidistantes a la ciudad de Alajuela.

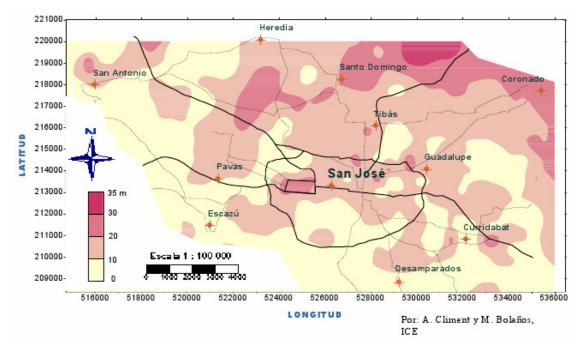


Fig. 8. Espesor del material no consolidado en San José y alrededores (tomada de Schmidt et al., 2003).

CONCLUSIONES

De acuerdo a los registros acelerográficos obtenidos, tanto por el ICE como por el LIS, se puede indicar que durante la ocurrencia del Terremoto de Cinchona del 8 de enero de 2009 (M_w 6,2, IMM VIII-IX), se registro un valor de aceleración horizontal pico de 658 cm/s² en la estación ICBM, localizada a 14,4 km del hipocentro del evento, la cual se encontraba ubicada sobre un suelo blando de unos 20 m de profundidad. Del acelerograma obtenido en esta estación se cálculo una velocidad pico del terreno de 23,5 cm/s, una Intensidad de Arias de 2,4 m/s y una duración significativa del movimiento fuerte de 8,2 s, parámetros que confirman el poder destructivo de este sismo en la zona epicentral y alrededores, por lo que se considera que las obras civiles localizadas cerca del epicentro estuvieron expuestas a sacudidas sísmicas severas, con un alto potencial de generar daños en aquellas estructuras con un bajo nivel de ingeniería en el diseño y construcción. Condición que se vio agravada en sus efectos finales, debido a la combinación con efectos secundarios como deslizamientos y avalanchas, como sucedió en este terremoto en particular.

La distribución de todos los registros sísmicos mostró una atenuación más rápida, de la señal sísmica, en la dirección este-oeste, por lo que se considera que la energía del evento estuvo focalizada en la dirección norte-sur, en concordancia con lo mostrado por el mapa de isosistas de Intensidad Mercalli Modificada preparado por la RSN. La sacudida sísmica presento valores de aceleración pico menores al 5 % de g partir de los 30 km (aproximadamente) con respecto al hipocentro, y con un único valor singular de 17,8 % de g registrado en la estación SSAB localizada a 31 km.

Como parte de la enseñanza de este evento destructivo, se puede decir que la mejor medida para reducir la vulnerabilidad física de cualquier obra civil, ante la ocurrencia de sismos severos, es el adecuado diseño y construcción de las mismas, siguiendo la normativa indicada en el Código Sísmico de Costa Rica, y en aquellos casos más complejos, complementados y amparados a estudios ingenieriles, geológicos, sismológicos y de amenaza sísmica de detalle.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece toda la ayuda brindada por los asistentes Juan José Leitón y Fernando Fallas, que participaron en esta investigación a través de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica mediante el proyecto No 731-A2-905. Al Téc. Carlos Segura, encargado de recopilar toda la información digital de los acelerógrafos de la red del LIS. Igualmente a los Ings. Rosey Piedra y J.M. Barrantes del programa de seguridad sísmica del ICE.

REFERENCIAS

- 1. Alvarado, G.E, Morales, L.D., Montero, W., Climent, A. & Rojas, W., (1988), "Aspectos sismológicos y morfológicos en el extremo occidental de la cordillera volcánica central de Costa Rica", *Rev. Geól. Amer. Central*, 9: 75-98.
- 2. Arroyo, I. & Alvarado, G. E., (2002), "Evaluación de la neotectónica de la falla San Miguel y alrededores, enfocada en los proyectos hidroeléctricos Cariblanco y Toro III", Inf. Interno ICE, 25 pp.
- 3. Barquero, R. (ed.), (2009), "El Terremoto de Cinchona del 8 de enero de 2009", Red Sismológica Nacional (RSN: ICE-UCR), Reporte Técnico, 137 pp.
- 4. Barquero, R. & Climent, A., (2002), "P.H. Toro III. Estudio sismológico y de amenaza sísmica. Etapa de Factibilidad", Inf. Interno ICE, 19 pp.
- 5. Climent, A., Taylor, W., Ciudad Real, M., Strauch, W., Santana, G., Villagran, M., Dahle, A. & Bungum, H., (1994), "Spectral Strong Motion Attenuation in Central America". NORSAR Technical Report No. 2-17 RONDICA Project, 46 pp.
- 6. Climent, A., Barquero, R. & Alvarado, G.E., (2002), "Estimación de la amenaza sísmica del P.H. Cariblanco", Inf. Interno ICE, 8 pp. + figs.
- 7. Climent, A., Alvarado, G.E. & Boschini, I., (2006), "P.H. Toro 3, Estudio de amenaza sísmica", Inf. Interno ICE, 22 pp.
- 8. Climent, A., Schmidt, V., Hernández, D., Cepeda, J., Camacho, E., Escobar, R. and Strauch, W. (2007), "Strong motion monitoring", In: Bundschuh, J. & Alvarado, G. (Eds). "Central America, geology, resources, hazards", Vol. 2, Taylor Francis/Balkema, The Netherlands, Pp. 1129-1153.
- 9. CNE, (2009), "Evento: Sismo 6,2 Richter. Inmediaciones de Cinchona-Poasito-Varablanca. Provincia de Alajuela-Heredia- Informe de Situación No. 19", Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias, Gobierno de Costa Rica, Centro de Operación de Emergencias, COE. 39 pp.
- 10. Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, (2003), "Código Sísmico de Costa Rica 2002", Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- 11. Linkimer, L., (2008), "Relationship between Peak Ground Acceleration and Modified Mercalli Intensity in Costa Rica", *Revista Geológica de América Central*, 38:81-94.
- 12. Schmidt, V., Dahle, A. & Bungum, H., (1997), "Costa Rican Spectral Strong Motion Attenuation", NORSAR, Technical Report, 45 pp.
- 13. Schmidt, V., Moya, A., Climent, A., Rojas, I. & Boschini, I., (2005), "Microzonificación sísmica de San José, Costa Rica", Editorial de la Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San José, Costa Rica.
- 14. Wald, D.J., Quitoriano, V., Heaton, T.H. & Kanamori, H., (1999), "Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California", *Earthquake Spectra*, Volume 15, No. 3. 557-564.