



Universidad Nacional de Jujuy
Facultad de Ingeniería



XI JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA
San Salvador de Jujuy, 23 y 24 de Junio de 2016



Respuesta del subsuelo ante un sismo intenso: análisis de una sección transversal del Valle de Lerma (Salta)

Astorga¹, Héctor, Orosco^{1,2}, Lía, Albarracín^{1,2}, Fernando, Viramonte², José.

(1) *Instituto de Estudios Interdisciplinarios de Ingeniería – Universidad Católica de Salta, Campo Castañares, Salta, Argentina, iesiing@ucasal.net.*

(2) *Instituto Geonorte, Universidad Nacional de Salta, Bolivia 5150, Salta, Argentina viramont@unsa.edu.ar, orosco@unsa.edu.ar*

RESUMEN: Este trabajo es un aporte a la estimación del riesgo sísmico que afecta a la Ciudad de Salta, que se asienta en el sector NE del Valle de Lerma; es un valle sedimentario con profundidad y constitución del manto cuaternario variables. Se muestran resultados de estudios analíticos de la respuesta del suelo ante sismos intensos, obtenidos por el método de elementos finitos, que utiliza un modelo numérico bidimensional (QUAD4M); se analiza una sección transversal del valle, a fin de determinar el modo en que parámetros como el perfil del valle, las características de sus capas de suelos y el contenido frecuencial de la señal inciden en fenómenos de amplificación de la señal sísmica. Los parámetros geotécnicos y dinámicos del subsuelo, son estimados por datos obtenidos en campo, mediante sísmica de refracción, en algunos puntos del perfil (Vs30). Las amplificaciones de la respuesta se expresan en términos de valores pico y espectros de respuesta elásticos. Los resultados muestran la existencia de amplificaciones, sobre todo en los bordes del perfil analizado.

ABSTRACT: This work is a contribution to the estimation of seismic risk affecting Salta city, which lies on NW sector of Lerma Valley; it is a sedimentary valley with variable depth and constitution of the quaternary mantles. Results of analytical studies applying the finite element method and a two-dimensional numerical model (QUAD4M) are shown; one cross section of the valley is analyzed, to determine how parameters such as the profile of the valley, the characteristics of the soil layers and the frequency content of the signal, affect the seismic signal in the base rock. Geotechnical and subsurface dynamic parameters are estimated by Vs30 measurements. Amplifications of the response are primarily expressed in terms of peak values and elastic response spectrum. The results show amplifications in the cross section analyzed, especially at the edges.

Palabras claves: efectos de sitio, Vs, QUAD4M, valles sedimentarios.

Keywords: Site effects, Vs, QUAD4M, sedimentary valleys.

INTRODUCCION

Este trabajo es un aporte a la estimación del riesgo sísmico que afecta al sector NE del Valle de Lerma, donde se asienta la Ciudad de Salta (capital de la provincia del mismo nombre) y su área metropolitana, zona que constituye un conglomerado urbano de más de medio millón de habitantes. La ciudad se funda sobre un valle sedimentario con profundidad y constitución del manto cuaternario variables.

Tiene como objetivo mostrar avances en el estudio de la peligrosidad sísmica, atendiendo al comportamiento del subsuelo ante la acción

sísmica. Se muestran resultados de estudios analíticos que aplican el método de elementos finitos y utilizan un modelo numérico bidimensional mediante el código QUAD4M, (Hudson et al., 1994; Idriss et al., 1970); en este caso se analiza una sección transversal del valle con orientación Este-Oeste, a fin de determinar el modo en que parámetros como el perfil del valle, las características de sus capas de suelos y el contenido frecuencial de la señal inciden en fenómenos de amplificación de la señal sísmica. Los parámetros geotécnicos y dinámicos del subsuelo que los métodos analíticos necesitan,



Universidad Nacional de Jujuy
Facultad de Ingeniería



**XI JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA**
San Salvador de Jujuy, 23 y 24 de Junio de 2016



son estimados por resultados de mediciones de Vs30, mediante sísmica de refracción.

A fin de dar los valores adecuados a los parámetros del amortiguamiento de Rayleigh adoptados por el programa, y evitar así los efectos de sobre-amortiguamiento comunes en estos estudios, es necesario determinar el periodo correspondiente a la máxima aceleración espectral del registro sísmico utilizado.

Se eligieron dos acelerogramas reales como registro sísmico de entrada.

DESCRIPCIÓN DEL PERFIL ESTUDIADO

Ubicación del Perfil transversal

El perfil transversal en estudio tiene como orientación Este-Oeste y se ubica en la zona central de la Ciudad de Salta Capital, en coincidencia con el cerro San Bernardo (Fig. 1). El perfil, denominado A-B, tiene una extensión de 12 km aproximadamente y los espesores están en el orden de 10 a 500 metros.

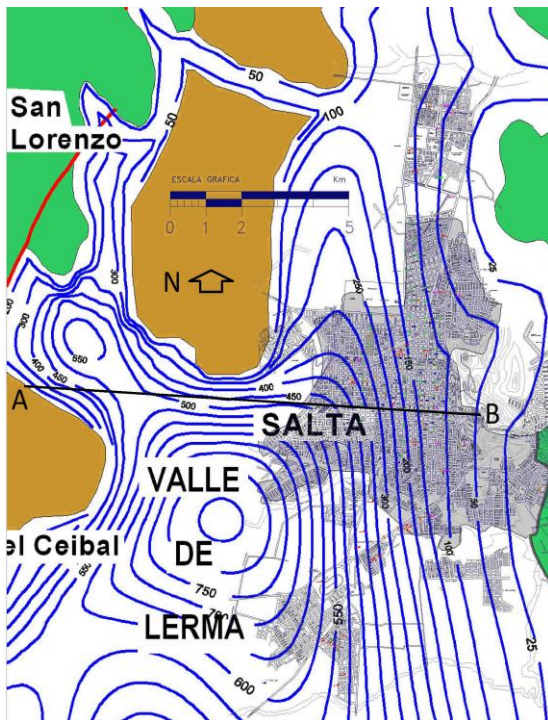


Figura 1. Ubicación del perfil A-B, e Isopacas en el Valle de Lerma determinadas por gravimetría. Modificado de Colombi et al. (2000).

Registro sísmico de entrada.

Los sismos más intensos que se esperan afecten a Salta se originan en fallas ubicadas a unos 100 km al este, en el frente de deformación de la Sierra Oriental; no se cuenta con registros de esa zona sísmogénica, pero sí con SL10TR, componente transversal del sismo del 27 de Febrero de 2010, registrado en San Lorenzo, que tuvo una magnitud de 6,1 y se originó en el sistema Calama-Olapato-Toro al oeste de la ciudad. Se utilizó también SJLO, componente longitudinal del sismo de Caucete 1977 registrado en la sede del INPRES, en San Juan. El mismo fue adoptado pues fue registrado en suelo firme, tiene una fase intensa de gran duración y el parámetro de Vanmarcke dio un valor de 0,51, por lo que es de banda ancha, con un contenido frecuencial de amplio rango.

El parámetro de interés necesario para calibrar la matriz de amortiguamiento es el periodo correspondiente a la máxima aceleración espectral, que pueden apreciarse en la Fig. 7 y Fig. 8.

Malla de Elementos Finitos

A fin de delinear la topografía sub-superficial del valle en coincidencia con la sección de estudio, se tomó en consideración el mapa de isopacas obtenidas mediante la aplicación de técnicas de prospección gravimétrica por Colombi et al., (2000) y el trabajo de Peralta (2005). Esto ha permitido desarrollar un modelo geológico que define el espesor y geometría de los depósitos sedimentarios cuaternarios existentes por encima de la roca base representada por los depósitos Cenozoicos.

En la Fig. 1, se muestra el mapa de isopacas correspondientes al sector del Valle de Lerma obtenido por Colombi et al. (2000). Se puede observar que en el sector que subyace la ciudad, los espesores están en el orden de 10 a 500 metros.

Los perfiles obtenidos se suavizaron, pero siempre conservando las características que son determinantes para analizar la respuesta de cada sitio, al fin de lograr perfiles altamente representativos (Fig. 6).

Se utilizaron elementos cuadriláteros y triangulares de cuatro y tres nodos, respectivamente. Se trata de elementos bilineales de dimensiones variables. En los primeros 100 metros de profundidad se densificó la malla con elementos más delgados ya que, a partir de realizar un estudio de la sensibilidad del



Universidad Nacional de Jujuy
Facultad de Ingeniería



**XI JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA**
San Salvador de Jujuy, 23 y 24 de Junio de 2016



programa a diversos parámetros, se concluyó que es más sensible al cambio en el espesor que en el ancho de los elementos. La malla resultante posee 1913 elementos y 2043 nodos.

Borde transmisor y grados de libertad de nodos de elemento.

Se establecen las características que poseen los nodos que representan la roca y que transmiten el registro sísmico de entrada. Para ello se tiene en cuenta que cuando se usa una base transmisora, el movimiento de entrada es una función de las propiedades del material del semiespacio por debajo de la malla, y las propiedades y geometría

de la malla. Esto permite que el borde transmisor se comporte como amortiguador de las reflexiones de la onda sísmica en dirección horizontal (borde absorbente). De esta manera se puede eliminar la necesidad de asumir una fundación rígida. Para ello se considera las velocidades de onda de corte y compresión y el peso unitario para el material debajo de la roca, lo que permite una mejor modelación del problema (Hudson et al, 1994).

Se consideran todos los nodos del relleno cuaternario con movimiento impedido en dirección vertical, mientras que el movimiento en dirección horizontal está permitido.

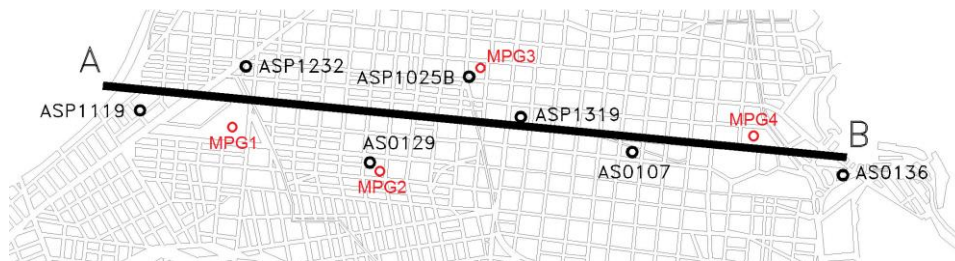


Figura 2. Zona de la ciudad de Salta donde se encuentra ubicado el Perfil A-B con los pozos de agua cercanos (Pozos: ASP y AS0, Mediciones Prospección Geofísicas: MPG).

Materiales

El conocimiento de la estructura de suelo que subyace a la Ciudad de Salta proviene primordialmente de los pozos para extracción de agua realizados en algunos sitios de la Ciudad. El análisis de los mismos denota una estructura muy heterogénea, donde las capas de limos, arcilla, arena y grava, de distinta consistencia y espesor, se ordenan en distintas secuencias según el sitio, marcando diferencias aun a distancias relativamente cortas. De todos modos, puede apreciarse una preponderancia de suelos gravosos al norte, cuyos tamaños máximo se hacen menores hacia el sur, donde prevalecen las arenas. En este caso el perfil de estudio posee intercalaciones variadas de distintos tipos de suelos, con predominio de la matriz arcillosa. En algunos sitios la profundidad de estos pozos supera la del modelo de isopacas, optándose por considerar el del modelo obtenido por gravimetría. En la Fig. 3 se puede observar los perfiles estratigráficos de los pozos que se tomaron como información para el perfil A-B. Estos se ordenaron según su ubicación relativa (Fig. 2).

Dicha estratificación se utilizó para tener en cuenta las curvas de relación de módulo cortante G/Gmax y relación de amortiguamiento vs la deformación al corte de cada material involucrado (Fig. 4). Mediante estas curvas el programa, actualiza las matrices de rigidez y amortiguamiento a medida que se va deformando el suelo.

Conformación de los perfiles de velocidades de ondas de corte.

Para poder conformar las matrices iniciales de rigidez y amortiguamiento se necesitan los valores iniciales de la relación de módulos de corte inicial G/Gmax para cada elemento de la malla. Para ello se procede a determinar los valores de G de forma indirecta a través de los valores de las velocidades de onda de corte (Vs). Esto se realiza por medio de la relación:

$$G = \frac{\gamma \cdot V_s^2}{g} \quad (1)$$

Donde γ es el peso específico del material del elemento y g la aceleración de la gravedad. Se



Universidad Nacional de Jujuy
Facultad de Ingeniería



**XI JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA**
San Salvador de Jujuy, 23 y 24 de Junio de 2016



toma G como un 70% de G_{max} , para determinar este último valor.

De esta manera, se procede a determinar los valores de V_s en función de la profundidad, es decir los perfiles de velocidades de ondas de corte.

Prospección Geofísica.

En algunos sitios de la ciudad se realizaron mediciones geofísicas, aplicando sismica de refracción activa (MASW).

El trabajo de campo se llevó a cabo durante el año 2015, utilizando un sismógrafo GEODE de 24 canales, con geófonos verticales de 4,5 Hz. Los sitios de estudios fueron (Fig. 2):

MPG1: Mercado Artesanal.

MPG2: Plaza Gurruchaga.

MPG3: Plaza Alvarado.

MPG4: Parque San Martín

La curva empírica de V_s lograda para la Plaza Alvarado (MPG3) se puede observar en la Fig. 5. Se tomaron los 13 primeros metros ya que esa fue la profundidad alcanzada claramente por las mediciones con este método activo, con la fuente de energía utilizada (maza de 7 kg). De estos estudios resultó que se debe dar mayor intensidad al a la entrada energética, por el alto ruido ambiental imperante.

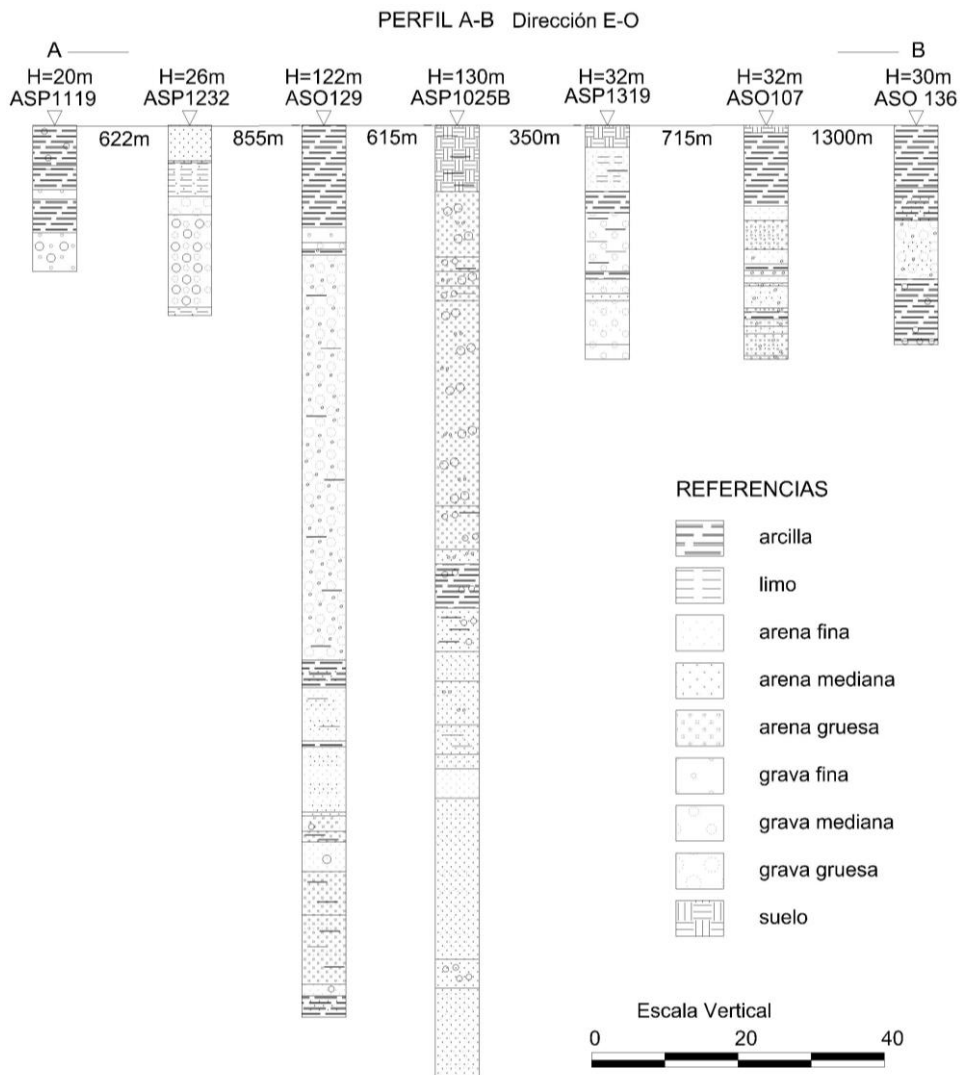


Figura 3. Perfil estratigráfico de los pozos de agua cercanos al perfil A-B.

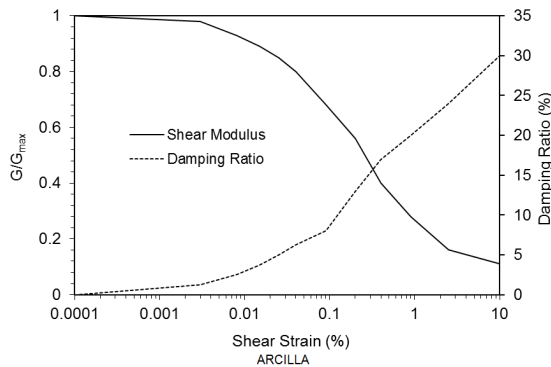


Figura 4. Curva de relación de módulos cortante y relación de amortiguamiento vs. porcentaje de deformación al corte.

Ajuste de las curvas V_s

Con el objetivo principal de tener valores de V_s hasta la profundidad máxima de 500 metros, se modelaron curvas analíticas. Se buscó que las mismas representen a los perfiles obtenidos empíricamente en los primeros 13 metros y sigan la misma tendencia hasta llegar a la velocidad de onda de corte de la roca ($V_s(\text{roca})$). Este último

valor se toma igual a 1500 m/s . El modelado se realizó mediante la ecuación (1) y las siguientes expresiones:

$$V_s = a \cdot Z^b \quad (2)$$

$$a = V_s(\text{Sup}) \quad (3)$$

$$b = \frac{\text{Log}(V_s(\text{Roca})^2 / V_s(\text{Sup})^2)}{\text{Log}(\Delta z)} \quad (4)$$

Donde, a y b son parámetros constantes del modelo y Z es la profundidad de cada capa de suelo (variable). Δz es la profundidad total y $V_s(\text{Sup})$ es la velocidad de onda de corte de la primera capa de suelo obtenida empíricamente.

En un solo sitio del perfil donde se tienen datos del suelo hasta los 15 metros de profundidad, fue posible aplicar fórmulas empíricas (Imai, 1977; Iami y Yoshimura, 1970; Imai et al., 1982, Japan Road Assoc., 2002, y Ohta y Goto ; 2000), y las velocidades obtenidas, fueron menores que las medidas.

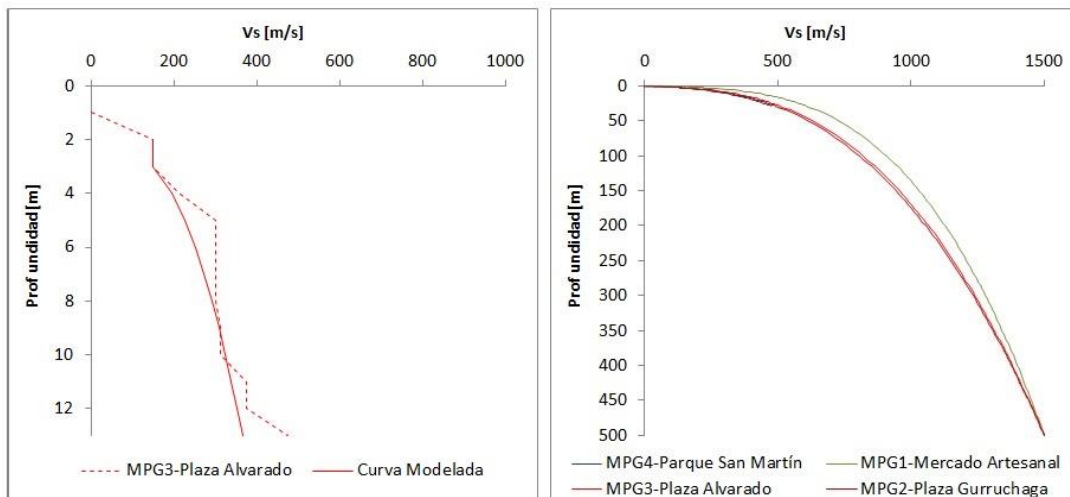


Figura 5. Ejemplo de perfil de V_s medido in situ (línea discontinua) y perfiles de V_s resultantes (líneas continuas) utilizados en el proceso.

En la Fig. 5, se encuentran dos gráficas. En la primera se muestra las curvas, modelada y real para el sitio MPG3 (Plaza Alvarado), hasta una profundidad de 13 metros. En la segunda se

observan las cuatro curvas modeladas hasta la profundidad máxima del perfil (500 metros).

RESULTADOS

Se muestran los resultados mediante la relación $AccSup/AccRoca$, donde el numerador es la aceleración pico en la superficie y el denominador es la aceleración pico en la roca

(Fig. 6). También se presentan los espectros de respuesta elásticos de los acelerogramas en tres sitios de interés de la sección transversal del valle estudiado (A, B y C) y de los dos acelerogramas de entrada (Fig. 7 y Fig. 8).

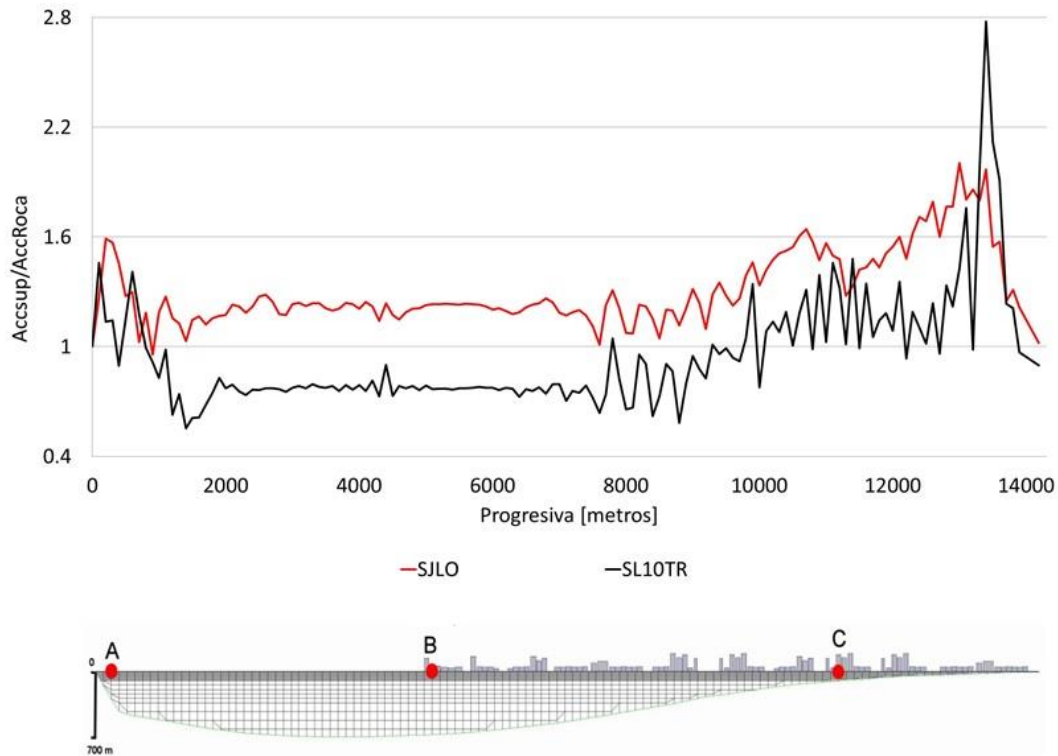


Figura 6. En parte superior: relación entre aceleraciones pico en la superficie ($AccSup$) y aceleración de entrada ($AccRoca$) en función de la progresiva, para los dos acelerogramas utilizados. En parte inferior: la sección transversal estudiada, señalando los sitios A, B y C para los que se muestran los espectros de respuesta elásticos de las señales obtenidas. Modelo de malla de elementos finitos utilizada.

Los resultados del análisis dinámico, en término de valores pico, muestran fuertes amplificaciones en los bordes del perfil del valle, fenómeno observado regularmente (Ciliz et al., 2007); en el caso local, en el extremo este se tienen mantos blandos de pequeño espesor que presentan fuertes cambios de impedancia con el suelo duro subyacente, mientras que en el oeste, la morfología muestra una abrupta pendiente que puede generar la concentración de rayos sísmicos por reflexión, a pesar de la atenuación de este fenómeno al considerar la roca como borde absorbente.

Los sismos utilizados tienen un componente espectral distinto; en la Fig. 7 puede apreciarse la respuesta del suelo para distintos períodos (o

frecuencias). SL10TR es más impulsivo y provoca las mayores amplificaciones para todas las frecuencias en el sitio C; SJLO presenta un desarrollo energético más uniforme en todo el rango de períodos analizados y para períodos entre 0,30 y 0,50 segundos, provoca mayores amplificaciones en el sitio A.

En el sitio C las amplificaciones se dan en el rango de los bajos períodos, coincidiendo con el período predominante de la mayoría de las edificaciones bajas de la ciudad, y un segundo input destacado entre los 0,5 y 0,8 segundos de período que corresponde a edificios entre 5 y 8 pisos en general, dependiendo de su diseño estructural.

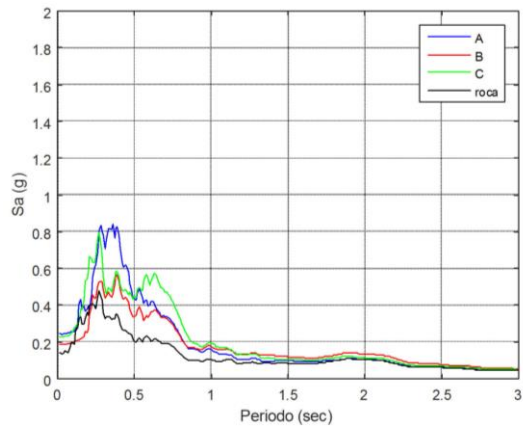


Figura 7. Espectros de respuesta elásticos de historias de aceleraciones obtenidas en los sitios A, B y C, en relación al espectro del registro de entrada SJLO (en negro).

Como se aprecia, la magnitud de las amplificaciones depende de las características de la acción sísmica que incide en el fondo del valle: valores pico, contenido frecuencial (que se analizan en este trabajo) y la duración que no fue considerada en esta oportunidad.

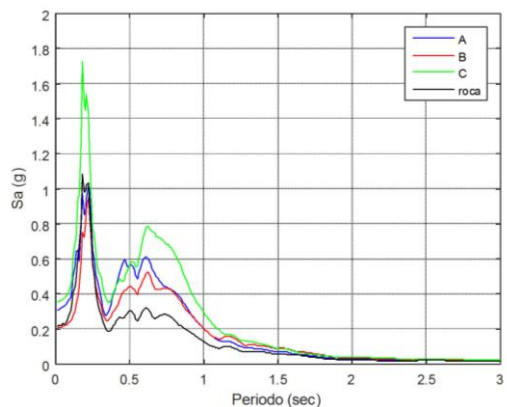


Figura 8. Espectros de respuesta elásticos de historias de aceleraciones obtenidas en los sitios A, B y C, en relación al espectro del registro de entrada SL10TR (en negro).

CONCLUSIONES

El subsuelo de la Ciudad de Salta presenta notoria heterogeneidad, ya que es un valle sedimentario compuesto por mantos cuaternarios blandos de

distinta composición y espesor, haciendo complejo el proceso de modelado.

En este trabajo se aplicaron los primeros resultados empíricos de V_{s30} obtenidos in situ, por el método MASW. Se han obtenido buenas curvas de dispersión hasta los 15 m, con las que se calibraron las curvas de variación de V_s con la profundidad;

Se deben complementar estos estudios con resultados de sísmica de refracción pasiva, mediciones que ya se están llevando a cabo, pero cuyos resultados no se aplicaron a este estudio. Para un mejor aprovechamiento de MASW se debe incrementar la energía del disparo, lo que se hará en el nuevo trabajo de campo, a iniciarse en la época invernal.

REFERENCIAS

- Ciliz, S., Özkan, Y. and Cetin, K., Effect of basin edge slope on the dynamic response of soil deposits, *4th Intern. Conf. on Earthq. Geotechnical Engineering, Greece. Paper N° 1309*, 2007.
- Colombi, A., Di Filippo, M. Gasparini, C. Viramonte, J.G. and Pergalani, F., Combined data among 3d gravity modeling and seismic amplification computed response to draw the seismic risk map in urbanized areas of Salta (Argentina); *International Symposium on Seismic Risk, Palm Spring, USA, 2000*.
- Hudson, M., Idriss, I.M. and Beikae, M., QUAD4M: A computer program for evaluating the seismic response of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base, *User's Manual, Dep. of Civil and Environmental Engineering, University of California*, 1994.
- Idriss, I.M., Lysmer, J., Hwang, R. and Seed B., QUAD4: A computer program for evaluating the seismic response of soil structures by variable damping finite element method, *Report n° EERC 73-16, Earthquake Engineering Research Center*, 1973.
- Imai, T., P and S wave velocities of the ground in Japan. *Proc. 9 Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Tokio, 2: 257 – 260*, 1977.
- Imai, T., y Yoshimura, Y., Elastic Wave Velocity and Soil. Properties in Soft Soil, *Tsuchi-to-Kiso, 18, 1: 17 – 22*, 1970.
- Imai, T. Tonouchi y K., Correlation of N-value with S-wave velocity and shear modulus? *Proc. 2°European Sym. Penetration Testing, Amsterdam: 57 – 72*, 1982.



Universidad Nacional de Jujuy
Facultad de Ingeniería



**XI JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA**
San Salvador de Jujuy, 23 y 24 de Junio de 2016



Japan Road Association, 2002. Specifications for Highway Bridges, *Part V, Seismic Design*.

Ohta, Y. y Goto, N., Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes *Earthq. Eng. Struc. Dyn* 6: 167 – 187, 2002.

Peralta, C.M., Estudio Geológico–Estructural del extremo norte del Valle de Lerma mediante la interpretación de datos gravimétricos (Salta-Argentina). *Tesis doctoral, Facultad de ciencias Naturales – UNSA*, 2005.