

Análisis de la respuesta sísmica local en el área urbana del gran Mendoza.

Local seismic response in the urban area of the “great Mendoza”

Camilo Andrés Mancipe Herrera*

Resumen

La ciudad de Mendoza y sus alrededores, constituyen un núcleo urbano desarrollado en un área de fuerte actividad sísmica. Por tanto son necesario estudios, que puedan establecer la respuesta sísmica local. La primera actividad en este tipo de estudios, es la recopilación de información geotécnica local, en términos de la caracterización de los depósitos aluviales, referente a la velocidad de onda de corte, densidad de los suelos y sus propiedades dinámicas (curvas de rigidez y amortiguamiento). Por otra parte, los análisis de efectos de sitio sísmicos, fueron establecidos, mediante la recopilación de señales, representativas de la actividad sísmica en el área de estudio; tomando señales, tanto en campo cercano, como en campo intermedio. Este estudio, muestra una síntesis del cálculo de los efectos de sitio sísmicos en diferentes puntos del área urbana del Gran Mendoza”

Palabras clave: Mendoza, efectos de sitio sísmicos, microzonificación sísmica, condición de campo cercano.

Abstract

The city of Mendoza and its surroundings constitute an urban nucleus developed in a region of strong seismic activity. Therefore, studies aimed to establishing the local seismic response are needed. The first stage of these studies are given by the compilation of geotechnical information enabling an approximate characterization of the existing alluvial deposits, in terms of their shear wave velocities, soil densities and stiffness and damping degradation curves. On the other hand, assessments on the seismic site effects were made taking into account the seismicity of the area by means of signals representing earthquakes both in near field condition and in far and inter-mediate distant condition. This paper presents a synthesis of calculations of seismic site effects in different points of the urban area.

Keywords: Mendoza, seismic site effects, seismic micro-zonation, near field condition.

* Área Geotecnia - IMERIS, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.ingcamilomancipe@yahoo.com

I. INTRODUCCIÓN

El Gran Mendoza es la cuarta ciudad por número de habitantes de la Argentina, con cerca de 850.000 habitantes, según censo INDEC de 2001.

La Figura 1, se ilustra, la ubicación de la provincia de Mendoza en Argentina y en el Cono Sur de América.

Este trabajo se llevó a cabo en el área urbana del “Gran Mendoza” (destacada en la Figura 2, la cual está compuesta por los seis municipios siguientes: Las Heras al norte, Guaymallén y Maipú al este, Godoy Cruz al oeste, Luján de Cuyo al Sur y la Capital (o Ciudad de Mendoza) en el centro del Área.

El Área se ha visto sometida a diversos eventos sísmicos durante su historia. Entre ellos cabe destacar uno de los más devastadores terremotos sufridos en la Argentina como fue el terremoto del 20 de marzo de 1861 cuya magnitud Richter estimada fue de 7.2 con intensidad IX de Mercalli. De acuerdo a la Ref. [1], el epicentro de este evento se localizó en la zona de la falla La Cal (aunque el INPRES anteriormente ubicó el epicentro en la zona de Barrancas, Maipú, Mendoza). Durante el siglo XX la región se ha caracterizado por tener sismos de mediana a baja magnitud, destacando el sismo del 26 de enero de 1985, con magnitud Richter de 5.7 y con epicentro en la zona de Barrancas a 35km al SE de la ciudad de Mendoza, según la Ref. [2].

Este trabajo tiene por objeto efectuar una determinación aproximada de las solicitaciones sísmicas de superficie a partir de la información disponible. Este trabajo se constituye en un gran aporte en el análisis de los efectos de sitio, como han sido los trabajos de (Barchiesi y Mancipe), Refs. [16] y [17].

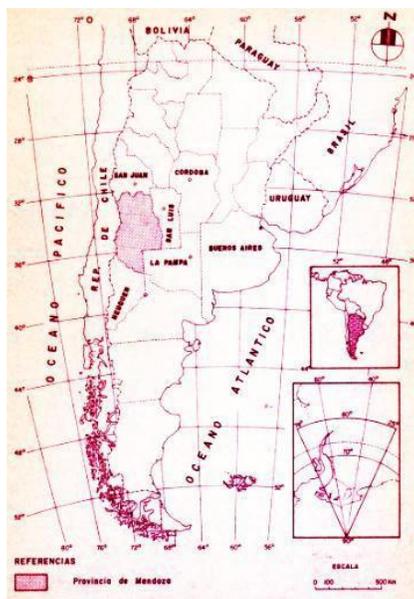


Figura 1. Localización de la provincia de Mendoza, Argentina, tomada de (Ref. [3]).

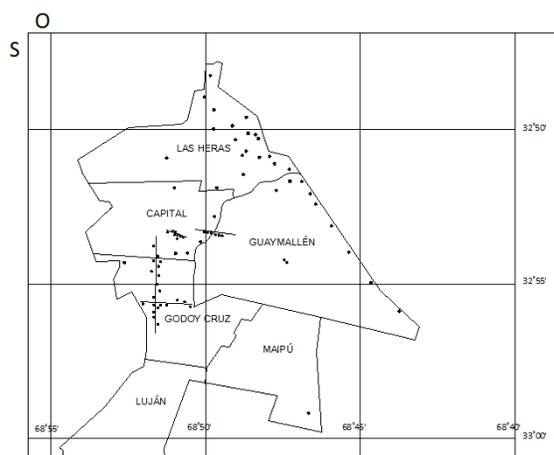


Figura 2. Localización del Área de estudio “Gran Mendoza” con sus municipalidades componentes

Otros aportes muy importantes al mismo objetivo, están efectuándose por un lado, a través de un proyecto de investigación bianual 2011 – 2013 financiado por la UN Cuyo, y por el otro en el marco de un proyecto financiado por el Consorcio Interuniversitario Italiano para la Argentina, liderado por la Universidad “Federico II” de Nápoles y con la participación de la Universidad “La Sapienza” de Roma, la Universidad de Basilicata, la Universidad Nacional de Cuyo y la Universidad Nacional de San Juan.

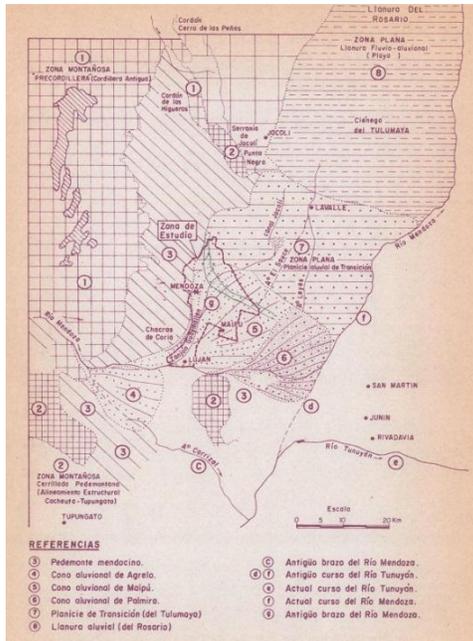


Figura 4. Unidades geomorfológicas aluviales del Área de estudio (el Gran Mendoza), tomada de (Ref. [3]).

III CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

La caracterización geotécnica se realizó a nivel “teórico”, aprovechando la información geotécnica disponible en la región. La información de base se tomó de perfiles seleccionados de la Ref. [3] y de estudios de suelos para cimentaciones asumidos como confiables reunidos en la Ref. [4]. La caracterización geotécnica, se establece desde el punto de vista de los parámetros necesarios para la modelación de los perfiles y la posterior obtención de las solicitaciones sísmicas en superficie. Estos parámetros son el peso específico, la velocidad de onda de corte de los suelos y las curvas de rigidez (G/GMAX vs def. unitaria) y amortiguamiento (DAMPING vs def. unitaria).

A. Extrapolaciones para Pesos Específicos

Las extrapolaciones de peso específico se establecieron para las tres zonas aluviales del Área objeto de estudio, donde el criterio de zonificación fue la afinidad de los datos entre ciertas zonas o sub - zonas.

Los parámetros de correlación para el desarrollo de las ecuaciones fueron los valores del ensayo de SPT (N) y la profundidad (h).

En general las extrapolaciones mostraron mejor ajuste respecto al parámetro de profundidad que

frente a los valores de SPT. Las ecuaciones de extrapolación encontradas sirven para completar la información faltante a nivel de peso específico en los 72 perfiles geotécnicos usados en esta modelación.

B. Selección de ecuaciones, velocidad de onda de corte

Las ecuaciones de velocidad de onda de corte elegidas como representativas de cada zona se establecieron mediante un proceso de selección cuyo indicador (ΔV_s [%]) fue la diferencia entre los valores que arrojan las ecuaciones de correlación (“teóricas”) y los valores de velocidad medidos, referidos porcentualmente a estos últimos.

Destacamos que este proceso de selección de ecuaciones consistió principalmente en detectar las mejores ecuaciones de correlación preexistentes para vincular en cada grupo de suelos los resultados de SPT con la velocidad de onda de corte V_s . En ese sentido el proceso de selección es esencialmente distinto a las extrapolaciones referidas en el Numeral B consistentes en buscar para cada grupo de suelos, las mejores relaciones peso específico vs. SPT (N) y peso específico vs. profundidad (h). En este análisis se recopilamos ocho perfiles con registros de velocidad de onda de corte (V_s) tomados de las Refs. [3] y [4]. En cada caso la ecuación de velocidad se seleccionó entre unas ciento veinte ecuaciones empíricas que correlacionan V_s con el valor N de SPT. Estas ecuaciones están discriminadas por tipo de suelo, depósito y era geológica.

Debido a la cantidad reducida de perfiles de referencia (ocho), se estableció un procedimiento de selección de ecuaciones que re-presentan toda el Área de estudio y otras para amplias sub - zonas relativamente homogéneas con predominio de suelos “blandos” y suelos “duros” (o rígidos).

Las ecuaciones empíricas de velocidad seleccionadas en este proceso sirven para lograr la asignación de velocidad correlacionando los valores (N) del ensayo de SPT. Dentro de las ecuaciones seleccionadas en este proceso se encuentran ecuaciones tradicionales como Imai & Tonouchi (1982), ecuación recopilada en el trabajo Ref. [6] o Ohta & Goto (1978), ecuación recopilada en la Ref. [7]. En el caso de suelos rígidos las ecuaciones seleccionadas fueron de origen pleistocénico, lo cual indica la alta velocidad inmersa dentro de estos perfiles.

C. Curvas dinámicas de los suelos

Las curvas de rigidez y amortiguamiento que caracterizan los materiales fueron asignadas a criterio. Este criterio de asignación fue basado en información de ensayos parciales previos en el área de estudio, donde se indicó que los materiales poseían características de alta rigidez y bajo amortiguamiento. Las curvas elegidas fueron: Curva de Seed and Idriss, límite alto (arenas), Ref. [9], curva de Rollins, Ref. [10] límite medio alto (gravas) y curva de Vucetic and Dobry $IP=7$, Ref. [11] para suelos de grano fino (limos).

IV. MODELACIÓN PERFILES GEOTÉCNICOS

Se modelaron (setenta y dos, 72) perfiles geotécnicos, los cuales están ubicados a lo largo del área de estudio, ver Figura 2. El Software seleccionado para este proceso fue el programa en régimen no lineal (DEEP SOIL), Ref. [12]. El objetivo de esta modelación es encontrar la respuesta a nivel de espectros de aceleración y los periodos asociados a la aceleración máxima espectral. El estudio se establece a nivel de respuesta, debido a la carencia de información geotécnica e información local a nivel de señales de entrada; por esta razón, no es objetivo, establecer espectros de diseño, ni generar zonificación a fines de diseño en ingeniería.

La señal de entrada en la modelación es una señal tipo sintética obtenida a través del espectro de diseño del Reglamento INPRESCIRSOC (zona sísmica 4, suelo tipo 1), señal llamada de aquí en adelante como “señal de Norma). La forma de la envolvente para esta señal sintética, fue establecida, según las formas vistas en los eventos sísmicos de Mendoza de 1985 y 2006, Ref. [2]. También se utilizaron otras dos señales para establecer diferencias entre cada una. Las señales elegidas son una señal propia del área de estudio, registrada en gravas aflorantes, estación estación de Maipú durante el evento sísmico de Mendoza, de 1985, Ref. [2]. y por último de una señal obtenida en roca durante el sismo de Northridge de 1994, Ref. [8]. Todas las señales fueron escaladas a un valor de aceleración $a_{max}=0.35g$, este valor corresponde a la aceleración para periodo cero (A_0) del espectro de diseño del reglamento INPRESCIRSOC, (zona sísmica 4 y suelo tipo 1). Este valor representaría la aceleración pico (PGA), que tendría una señal de un evento fuerte en el Área de estudio.

V. RESULTADOS

A. Análisis de sensibilidad

Se realizó un estudio de sensibilidad frente a los parámetros con mayor incertidumbre, como lo es la velocidad de onda de corte y caracterización por material. Estos dos parámetros mantienen gran incertidumbre, ya que el primero, fue obtenido a través de correlaciones y el segundo fue asignado bajo criterio ingenieril. También se realizó un análisis para establecer la influencia en cuanto a la señal de entrada y el tipo de Software utilizado en 1D (Lineal equivalente y no lineal).

En la Figura 5, se muestra un ejemplo de sensibilidad por tipo de señal; en esta figura, se observa el espectro de respuesta de aceleración para el perfil No 4M; perfil ubicado bajo depósitos de sedimentos gruesos, con un pequeño espesor de limo superficial. También se puede observar como cada señal mantiene su propia respuesta a nivel de aceleración y periodo; también, como el espectro correspondiente a la señal sintética de Norma, se comporta como una envolvente frente a las dos señales de Northridge y Mendoza (Maipú) 1985.

En la Figura 6, se muestra la incidencia del tipo de software en la respuesta. Los software empleados en este análisis son: los programas en régimen lineal equivalente (SHAKE 91) Ref. [13] y (EERA) Ref. [14] y los programas en régimen no lineal (DEEP SOIL) Ref. [12] y (NERA) Ref. [15]. El perfil utilizado en este análisis fue el perfil No. 31M; perfil ubicado en un depósito de suelo arenoso limoso poco profundo. Debido a este gran contraste, se generan deformaciones altas, aproximadamente 0.3%.

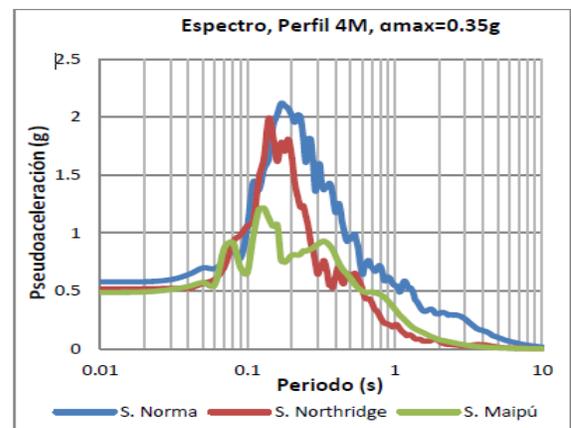


Figura 5 Sensibilidad por tipo de señal, perfil No.4M, $a_{max}=0.35g$

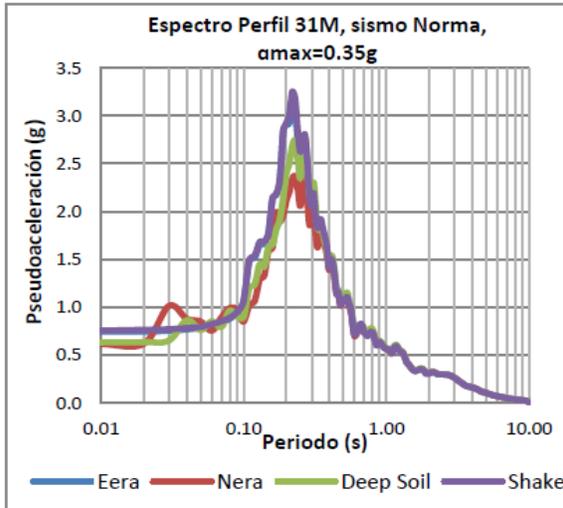


Figura 6. Sensibilidad por tipo de Software, Perfil No.31M, $a_{max}=0.35g$

Las mayores aceleraciones, se presenta en los programas en régimen lineal equivalente, mientras los programas en régimen no lineal, establecen gran desarrollo de amortiguamiento histérico por deformación, reflejado en las bajas aceleraciones espectrales.

Pruebas preliminares, muestran que el aumento de rigidez para las curvas (G/GMAX) y correspondiente aumento en la curva de amortiguamiento, no genera cambios apreciables para ningún tipo de suelo, ya sea en depósitos de suelo rígido o de sedimentos finos.

En el caso de usar curvas con baja rigidez, se presenta dos tipos de comportamientos; (a) el primero se presenta en suelos de grano grueso, donde se presenta un aumento en la aceleración espectral, debido a las bajas deformaciones presentadas; (b) el segundo comportamiento se establece en suelos de grano fino (altas deformaciones), en el cual se presenta un desplazamiento espectral hacia zona de periodos altos y fuerte disminución de las aceleraciones espectrales; comportamiento debido a la alta disipación de energía por amortiguamiento. Estos dos comportamientos se presentan en similares condiciones, cuando se disminuye la velocidad de los perfiles.

En las Figuras 7 y 8, se muestra un análisis, reduciendo la velocidad de los perfiles. Los perfiles geotécnicos para estas figuras, corresponden a los perfiles 4M y 25M respectivamente; el primero corresponde a un depósito de sedimentos gruesos y el segundo a un depósito de suelos finos.

El comportamiento presentado cuando se aumenta los valores de velocidad, es una tendencia a bajar las aceleraciones espectrales y tratar de recuperar su forma de respuesta en roca. En suelos muy blandos se muestra un corrimiento generalizado hacia zonas de periodos bajos y un ligero incremento de la aceleración espectral, pero solo en zona de bajos periodos.

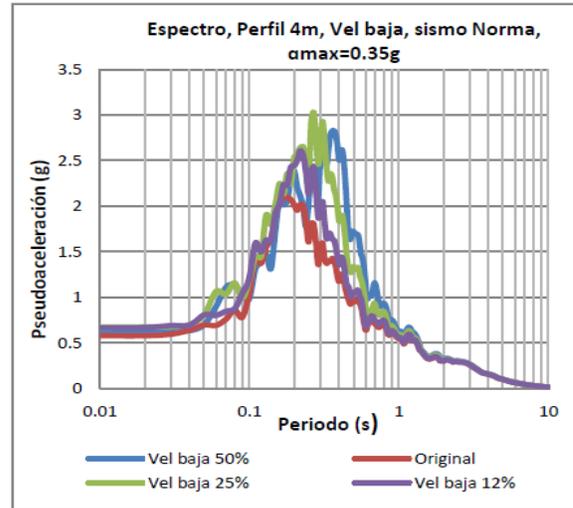


Figura 7. Sensibilidad velocidad baja, Perfil No. 4M, Sismo Norma, $a_{max}=0.35g$

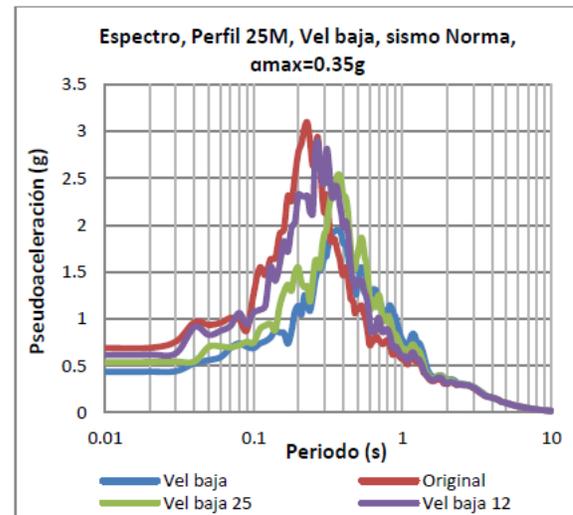


Figura 8. Sensibilidad velocidad baja, Perfil No. 25M, Sismo Norma, $a_{max}=0.35g$

C. Zonificación

Como se había mencionado en el Capítulo 4, debido a la escasa información sobre caracterización geotécnica y escasos registros sobre señales propias de la región, se hizo impráctico, el establecimiento de espectros de

diseño o la generación de una zonificación con fines de diseño en ingeniería; por tanto la zonificación establecida en este Numeral, fue elaborada solo a nivel de respuesta.

Para esta zonificación se establecieron seis diferentes zonas, cada una caracterizada por la forma típica de los espectros de respuesta de aceleración. En la Figura 15, se muestra un mapa con la ubicación de estas zonas. La señal de entrada, usada en la modelación de los (setenta y dos, 72) perfiles geotécnicos, fue la señal sintética del espectro de Norma; (señal de Norma), esta señal fue escalada a **$a_{max}=0.35g$** , valor que corresponde con la aceleración para periodo cero Ao del espectro del reglamento INPRESCIRSOC (zona 4, suelo tipo 1). (Aceleración de un evento fuer-te en el área del gran Mendoza). A continuación se hace una breve referencia para cada una de estas seis zonas definidas.

En la Figura 9, se muestra los espectros de respuesta de aceleración correspondientes a la zona 1, ((Sa máx=1.20-2g), periodo=(0.09-0.18s)). En esta figura, cada número, hace referencia al perfil, recopilado de la Ref. [3]. La letra acompañante "A", hace referencia a los perfiles de la Ref. [4]. Para cada figura se muestra superpuesto el espectro de diseño del reglamento INPRESCIRSOC, según el tipo de suelo que aplique a cada zona.

La zona 1, está ubicada en el área de depósitos gruesos del Cono Aluvial, en esta zona predominan depósitos gruesos en el sur. Hacia el norte empiezan a predominar medianos espesores de limos superficiales de (2 a 4m) de espesor. En esta zona también se encuentran perfiles con intercalaciones de arenas y limos superficiales de mayor espesor, debido al aporte de cauces provenientes del piedemonte Mendocino.

En la Figura 10, se muestra los espectros correspondientes a la zona 2, (Sa máx=2.2-3g, periodo=(0.19-0.30s)). Esta área, está ubicada en la zona de depósitos finos del Cono Aluvial. Los perfiles de esta zona, se caracterizan por tener espesores promedio de entre (7 a 10m) de arenas y limos superficiales, estratos superpuestos a gravas de alta velocidad de propagación de ondas de corte.

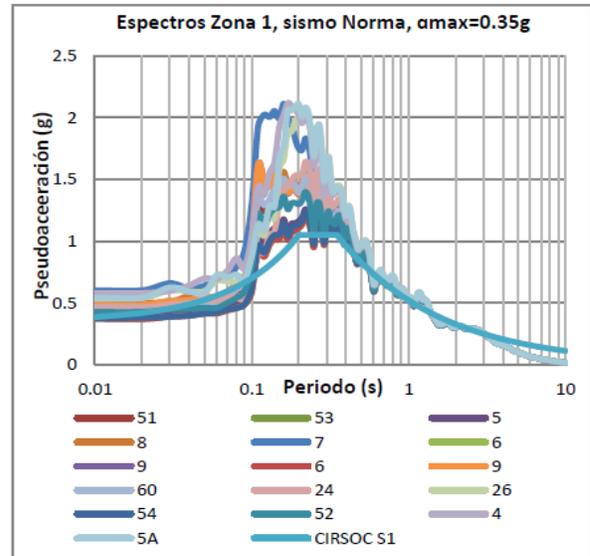


Figura 9 Espectros de respuesta, zona 1, sismo Norma, $a_{max}=0.35g$

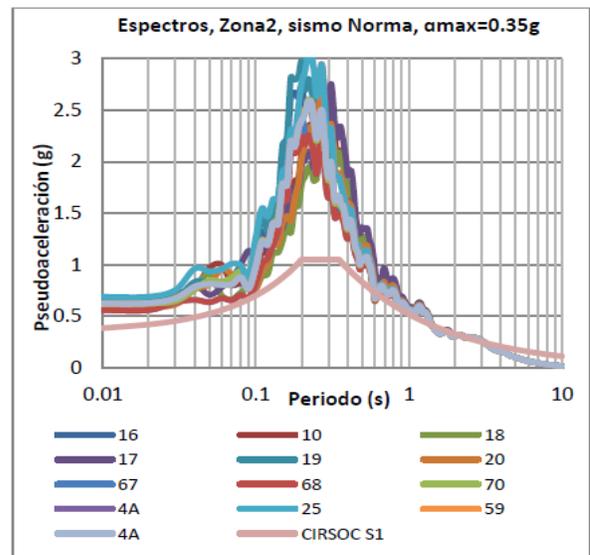


Figura 10. Espectros de respuesta, zona 2, sismo Norma, $a_{max}=0.35g$.

En la figura 11, se muestra los espectros de aceleración correspondientes a la zona No.3 (Sa máx=1.1-1.38g, periodo=(0.45-1), zona ubicada en un sector de depósitos finos profundos de la llanura aluvial. Las gravas de alta velocidad de propagación de ondas de corte, en este sector, se encuentran a profundidades variables entre (18 a 42m).

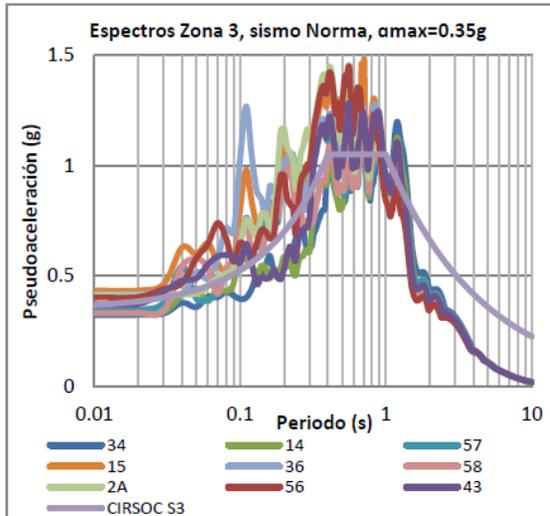


Figura 11. Espectros de respuesta, zona 3, sismo Norma, $a_{max}=0.35g$

En la Figura 12, se muestra los espectros correspondientes a la zona No. 4, ($S_a \text{ máx}=1.80-2.20g$, periodo=(0.34-0.45s)). Esta zona pertenece a un sector de depósitos finos poco profundos de la llanura aluvial. El espesor de limos superficiales, varía entre los (10 a 14m) de profundidad.

En la figura 13, se muestra los espectros de aceleración correspondiente a la zona 5, ($S_a \text{ máx}=2.20-2.80g$, periodo=(0.18-0.35s)). Esta zona está ubicada en un sector de depósitos arenosos poco profundos de la Llanura Aluvial. Los depósitos en esta zona están caracterizados por tener estratos de arenas y limos superficiales de (5 a 7m) de espesor, superpuestos a gravas de alta velocidad.

En la figura 14, se muestra los espectros de aceleración correspondientes a la zona 6, ($S_a \text{ máx}=1.15-1.40g$, periodo=(0.09-0.20)).

Esta zona está ubicada en el sector de depósitos gruesos del Cono Aluvial. Esta área, está dominada por depósitos de alta velocidad de propagación de ondas de corte, incluso, algunos perfiles, muestran gravas aflorantes.

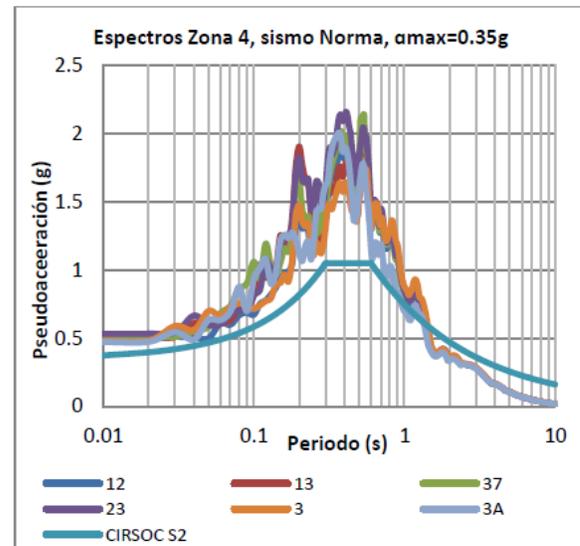


Figura 12. Espectros de respuesta, zona 4, sismo Norma, $a_{max}=0.35g$

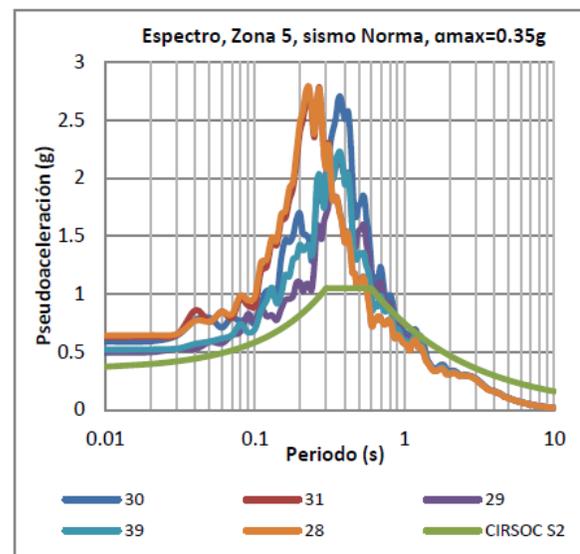


Figura 13. Espectros de respuesta, zona 4, sismo Norma, $a_{max}=0.35g$

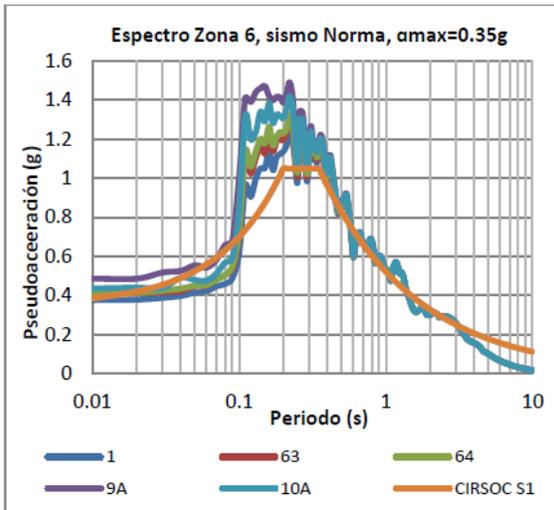


Figura 14. Espectros de respuesta, zona 6, sismo Norma, $a_{max}=0.35g$

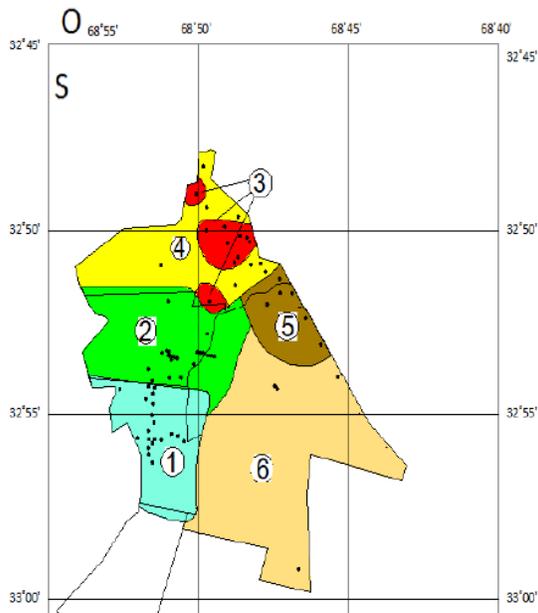


Figura 15. Espectros de respuesta, zona 6, sismo Norma, $a_{max}=0.35g$

VI. CONCLUSIONES

El proceso de modelación, se efectuó en detalle, considerando la información, registrada, cada metro en profundidad de los perfiles geotécnicos. Para aprovechar la información de los perfiles, se generó un proceso de extrapolación de la información existente en el área de estudio, a nivel de la densidad de los perfiles geotécnicos. La velocidad de onda de corte, se correlacionó con los valores de (N) del ensayo de SPT. Ensayo válido en este tipo de suelos granulares presentes en el

área de estudio. Las ecuaciones de correlación, fueron seleccionadas, por medio del procedimiento mostrado en el Capítulo IV. En total se utilizaron cerca de 120 ecuaciones, en este proceso de selección de ecuaciones representativas de amplias zonas dentro del Área de estudio.

El análisis de sensibilidad de Numeral V, mostró como en perfiles de grano grueso, al aumentar la velocidad de los mismos, los espectros de respuesta, tienen a disminuir los valores de aceleración espectral y en extremo a recuperar su forma de espectral en roca; situación contraria al efectuar una disminución en la velocidad de estos perfiles. Este comportamiento también se mostró al bajar la rigidez de los suelos.

En perfiles de grano fino, ante un aumento de velocidad, los espectros tienden a desplazarse hacia zonas de periodos bajos, más que en establecer aumentos de las aceleraciones espectrales. Cuando se baja la velocidad o se utilizan curvas de baja rigidez, se evidencia una fuerte tendencia de desplazamiento hacia zonas de periodos altos y una fuerte disminución en los valores de aceleración espectral, debido al gran desarrollo de amortiguamiento histéretico, por las altas deformaciones por corte presentadas.

La zonificación, se realizó usando un total de (setenta y dos, 72) perfiles geotécnicos. A partir de la respuesta sísmica de cada uno de los perfiles, se generó un mapa de zonificación a nivel de respuesta. En total se definieron seis diferentes zonas, mostradas en la Figura 6.7. Estas zonas encontradas, muestran diverso tipo de respuesta, desde los depósitos de baja amplificación, ubicados en áreas de sedimentos gruesos, hasta las zonas de mediana amplificación y espectros, desplazados hacia zona de periodos altos, en la zona de depósitos blandos de la Llanura Aluvial.

Las zonas de mayor contraste de velocidad, (zona de depósitos finos del Cono Aluvial), presentan fuertes amplificaciones y un periodo natural de los depósitos, muy cercano con el periodo dominante para las señales utilizadas en este Trabajo de Investigación.

Este Trabajo, se constituye en primer paso hacia el análisis de los efectos de sitio sísmicos en el área de estudio y es un aporte como lo han sido los trabajos de (Barchiesi y Mancipe), Refs. [16] y [17].

REFERENCIAS

- [1] Mingorance F., Morfometría de la Escarpa de Falla Histórica Identificada al Norte del Cerro La Cal, Zona de Falla La Cal, Mendoza, Revista de la Asociación Geológica Argentina 61 (4): 620.638 (2006).
- [2] Instituto Nacional de Prevención Sísmica INPRES, web pag. <http://www.inpres.gov.ar/>
- [3] Poder Ejecutivo Nacional, Ministerio de Obras y Servicios, Microzonificación Sísmica del Gran Mendoza, Mendoza (1989)
- [4] Barchiesi A.M. Proyectos Bienales 2007 - 2009, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza (2009)
- [5] R. B. Seed, K. O. Cetin, R. E. S. Moss, A. M. Kammerer, J. Wu, Recent Advances In Soil Liquefaction Engineering, 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, Long Beach USA, (2003)
- [6] Sykora D, Examination of Existing Shear, Wave Velocity and Shear Modulus Correlations in Soils, US Army Corp of Engineers, Mississippi (1987)
- [7] Generalitat de Catalunya, Departament de Política Territorial i Obres Públiques, Estimació dels Paràmetres dels sòls, Procediment i Aplicació a Barcelona, Barcelona (1996).
- [8] Youssef M. A. Hashash, Deep Soil V. 4.0, Gallery, Input Motions, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois, 2011.
- [9] Seed, H.B. and Idriss, I.M. Soil moduli and damping factors for dynamic analysis", Report No. EERC 70- 10, University of California, Berkeley (1970).
- [10] Rollins, K.M., Evans, M.D., Diehl, N.B. and Daily, W.D. Shear modulus and damping relationships for gravels, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 124(5), pp. 398-405 (1998).
- [11] Vucetic, M., and R. Dobry, Effect of soil plasticity on cyclic response, J. Geotech. Eng. ASCE, 117(1) (1991)
- [12] Youssef M. A. Hashash, Deep Soil V. 4.0, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois, (2011).
- [13] Shenabel, Lysmer and Seed, modifications by I. M. Idriss, Joshep I Sun, Shake 91, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, (1992).
- [14] J. P. Bardet, K Ichii, C.H. Lin, Eera, Department of Civil Engineering, University of Southern California, (2000).
- [15] J. P. Bardet, T. Tobita, Nera, Department of Civil Engineering, University of Southern California, (2001).
- [16] Barchiesi A.M. y Mancipe C.A. (2012) "Efectos de sitio sísmicos en la ciudad de Mendoza y alrededores: avances en la determinación de las propiedades dinámicas de los suelos", XXI Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (XXI CAMSIG 2012). ISBN 978-987-28643-0-9. Rosario, Santa Fé, 2012
- [17] Barchiesi A.M. and Mancipe C.A. (2013) "Seismic site effects in the city of Mendoza and surroundings (Argentina)" – "Effets de site sismique dans la ville de Mendoza et les environs (Argentine)", Proceedings of the 18th. International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (18 ICSMGE), París, September 2013 (ISBN en trámite).