

ESTUDIO DEL PARÁMETRO VS30 MEDIANTE EL ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES EN LA CIUDAD DE VALENCIA, EDO. CARABOBO

MARYSOL MIJARES^{1,a}, MICHAEL SCHMITZ^{1,2,b}, JAVIER SÁNCHEZ-ROJAS², FREDDY RONDÓN^{1,2}

¹Universidad Simón Bolívar (USB), Dpto. de Ciencias de la Tierra, Caracas, Venezuela.

²Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Dpto. de Geofísica, Caracas, Venezuela.

e-mail:^amarysolmijares@gmail.com; ^bschmitzschutt@gmail.com

Recibido: febrero de 2021

Aprobado para publicación: mayo de 2021

RESUMEN

El promedio de la velocidad de ondas de corte o velocidad de ondas S (abreviada Vs) en los primeros 30 m de espesor es un parámetro geofísico ampliamente utilizado en la caracterización de áreas urbanas (parámetro Vs30). Además, este representa un insumo de vital importancia para el proyecto de microzonificación sísmica de las principales urbes de Venezuela. Utilizando el método IMASW, que combina los fundamentos de la interferometría sísmica y el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW), se procesaron los registros de 64 tendidos de ruido sísmico ambiental distribuidos en el Área Metropolitana de Valencia (AMV) para obtener perfiles 1D de Vs mediante la inversión de curvas de dispersión. Además, los datos sísmicos fueron re-procesados mediante el método ReMi. Asimismo, se emplearon estos resultados para elaborar un mapa de Vs30 integrando los valores por aproximación topográfica, además de la base de datos de Vs30 NEHRP, derivados de perforaciones geotécnicas SPT. Mediante la norma venezolana COVENIN 1756-1:2019, se obtuvo la clasificación de sitio del mapa Vs30 obtenido, encontrándose que en los suelos urbanizados del área de estudio domina la clase de sitio D (Vs30 entre 200-300 m/s), tanto hacia el centro de los valles aluviales como hacia el sur del área de estudio. Asimismo, hacia los estribos montañosos, las clases de sitio aumentan de CD hasta C. Las clases de sitio B y BC (Vs30 >650 m/s) se obtienen específicamente en los altos topográficos que, en general, son áreas montañosas no urbanizadas.

Palabras claves: Vs30, ondas superficiales, IMASW, ReMi, ruido sísmico, SPT, clasificación de sitio, NSPT-Vs.

A STUDY OF THE VS30 PARAMETER BY MEANS OF MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES IN THE CITY OF VALENCIA, CARABOBO

ABSTRACT

Average shear wave velocity in the upper 30 m (Vs30) is one of the several parameters widely used in geophysical characterization of urban areas. In addition, this represents an input of vital importance for the Seismic Microzoning Project of the main cities of Venezuela. Using the IMASW method, which combines the fundamentals of seismic interferometry and Multichannel Surface Wave Analysis (MASW), 64 ambient seismic noise lines distributed in the Metropolitan Area of Valencia (AMV) were processed to obtain 1D profiles of Vs by dispersion curve inversion. In addition, the seismic data was re-processed using the ReMi method for comparison purposes. Furthermore, these results were used to develop a Vs30 map adding on Vs30 values by topographic approximation, along with Vs30 NEHRP database, derived from SPT boreholes. By means of the Venezuelan standard COVENIN 1756-1:2019, the site classification of the Vs30 map was obtained, finding that in the urbanized soils of the study area, site class D predominates (Vs30 between 200-300 m/s), towards the center of the alluvial valleys and the lake plain, to the south of the study area. Toward the mountains, the site classes increase from CD to C. The site classes B and BC (Vs30 >650 m/s) are obtained specifically in the topographic highlands that, in general, are non-urbanized mountainous areas.

Keywords: Vs30, surface waves, IMASW, ReMi, seismic noise, SPT, site classification, NSPT-Vs.

INTRODUCCIÓN

En función de mitigar el riesgo sísmico, el Proyecto de Microzonificación Sísmica de FUNVISIS busca delimitar las microzonas que muestran relativa uniformidad en respuesta ante la excitación sísmica en las principales urbes del país (Schmitz et al., 2015). El Área Metropolitana de Valencia (AMV) posee un contexto de amenaza sísmica enmarcado por la compleja interacción tectónica Caribe-Sur América (Audemard, 2014); la sismicidad de la zona aunado a los efectos de sitio, producto del espesor

sedimentario de la cuenca urbana, la colocan en una situación de peligro sísmico elevado (COVENIN, 2019). Además, el riesgo sísmico de la ciudad está vinculado a la calidad de los suelos presentes en el AMV, que son en su mayoría sedimentos del Cuaternario, lo que los hace susceptibles al fenómeno de licuación (Pombo, 2018). En este sentido, la caracterización geofísica es un eje fundamental de la microzonificación sísmica urbana. Por ello, el estudio de las condiciones locales de la velocidad de las ondas S, específicamente el parámetro Vs30, definido como el promedio de la velocidad de ondas de corte en los

primeros 30 metros de profundidad, es especialmente relevante, ya que este parámetro se relaciona con la rigidez (módulo de corte) y la densidad del material por donde las ondas se propagan, lo que permite caracterizar la calidad geotécnica del subsuelo somero y, por consiguiente, estimar la amplificación del movimiento sísmico (Borcherdt, 2012). En diversas recomendaciones internacionales de construcción civil e ingeniería sísmica, tales como las del NEHRP (BSSC, 2003), se determina la calidad del subsuelo superficial mediante el parámetro Vs30, asociándole un rango de velocidades a una clasificación de sitio, de acuerdo a la rigidez, compactación o sus propiedades geotécnicas.

Para llevar a cabo el presente trabajo de investigación, se contó principalmente con datos sísmicos y datos geotécnicos proporcionados por FUNVISIS; los datos sísmicos constaron de los registros de 64 tendidos de ruido sísmico ambiental distribuidos en el AMV en los municipios Naguanagua, San Diego y Valencia (parroquias San José, Catedral, San Blas, Candelaria, El Socorro, Miguel Peña, Santa Rosa y Rafael Urdaneta) La distribución e identificación de los mencionados tendidos, así como, la geología local del área de estudio, se aprecia en la Figura 1.

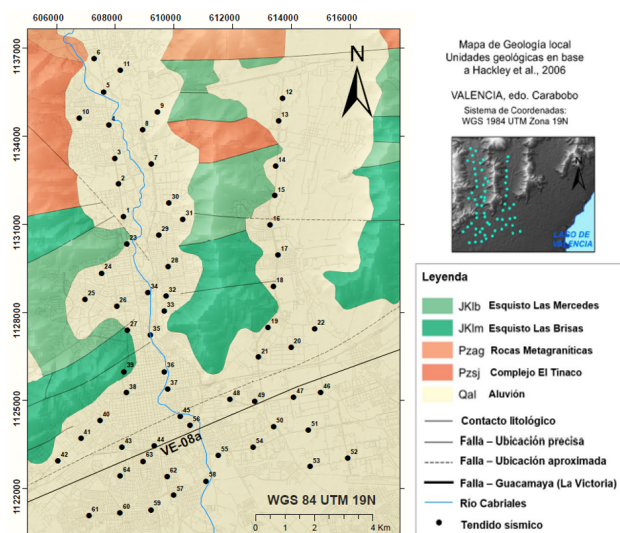


Figura 1. Distribución de los 64 tendidos sísmicos y geología local del área de estudio.

La adquisición de los datos fue llevada a cabo por FUNVISIS (Parra, 2012), donde se obtienen valores del Vs30 utilizando el método ReMi para el procesamiento de los datos. Además de los datos sísmicos, se contó con un inventario de reportes geotécnicos SPT o Ensayos de Penetración Estándar. La información de estos ensayos geotécnicos permitió obtener perfiles 1D de NSPT-Vs en función de la relación empírica NEHRP (BSSC, 2003), que relaciona la velocidad de ondas de corte con el número de golpes (N) de una perforación SPT. Esta conversión fue sugerida y utilizada en el estudio antecedente de Márquez y Morales (2009). Además, a partir de la información litológica de las perforaciones, se optó por realizar dos perfiles estratigráficos 2D ubicados en los municipios Naguanagua y San Diego, con profundidades entre los 8 a 20 m.

En concreto, la caracterización de las condiciones locales del sitio de estudio representa el principal punto de partida para la elaboración de ordenanzas municipales complementarias a la Norma Sísmica Venezolana (COVENIN, 2019) que pueden definir los criterios sismorresistentes a los que deben ajustarse los proyectos de índole civil y urbanística. Por lo tanto, en este contexto tienen especial relevancia los métodos geofísicos que permiten estimar la respuesta sísmica del subsuelo de maneras no invasivas. De esta manera, los métodos que emplean el estudio de ondas superficiales mediante fuentes de índole natural (pasiva) resultan técnicas rentables y convenientes.

Asimismo, la interferometría sísmica pasiva es una rama de la investigación geofísica de mucha utilidad en ambientes urbanos, ya que, permite obtener resultados con relativa practicidad y eficiencia. Esta técnica consiste en generar nuevas respuestas sísmicas a partir de fuentes virtuales mediante la correlación cruzada de señales de fuente pasiva. O'Connell y Turner (2011) postulan el método del Análisis Multicanal de Ondas Superficiales Interferométrico o IMASW (por sus siglas en inglés) para el estudio del subsuelo superficial o de profundidades someras, vinculando la interferometría sísmica con el método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW, por sus siglas en inglés) propuesto por Park et al. (1999). Por consiguiente, los datos sísmicos fueron procesados mediante el método IMASW para obtener curvas de dispersión asociadas a cada tendido. Con la intención de comparar diferentes métodos para estudiar la congruencia de los resultados, se reprocesaron los datos de ruido sísmico mediante el método ReMi (Refacción de Microtremores) propuesto por Louie (2001).

De esta manera, el objetivo general de este estudio se basó en estudiar el comportamiento de la velocidad de ondas S en el subsuelo somero de la ciudad de Valencia, mediante técnicas no invasivas. El motivo principal de este trabajo fue obtener un mapa de Vs30 soportado por los métodos geofísicos antes mencionados, integrando también la información de la estratigrafía geotécnica. Además, se exponen los resultados más relevantes asociados al mapa de Vs30, como la estimación de modelos geológicos de las capas superficiales del área de estudio y perfiles bidimensionales de las ondas de corte en la ciudad de Valencia, en función de que estos productos sirvan de insumo para la microzonificación sísmica de la ciudad.

METODOLOGÍA

En la fase preliminar de este proyecto se realizó una revisión y estudio exhaustivo de la información geológica, cartográfica y geofísica antecedente, así como la teoría de los métodos geofísicos a utilizar.

Además, previo a la ejecución de este trabajo se procuró contar con una amplia base de conocimientos técnicos, además de entender el contexto geológico al cual se supedita este estudio. A continuación, se presenta una descripción de las fases más relevantes en las que se sustenta este trabajo:

Fase I: Procesamiento de los datos sísmicos

Los datos sísmicos son el principal insumo de este trabajo. Según lo establecido por Parra (2012), la adquisición se realizó a partir de 48 geófonos de 4,5 Hz ajustados a land streamers y 2 sismógrafos digitales (Geometrics Geode). Los registros sísmicos contaron con ventanas de tiempo de 30s, adquiriendo alrededor de 15 grabaciones por tendido. Es preciso mencionar que, los resultados del mencionado estudio antecedente fueron tomados en cuenta para comparar los modelos de velocidad, los resultados del Vs30 de cada tendido y la congruencia del método geofísico utilizado.

De manera generalizada, el flujo de trabajo del procesamiento IMASW se basó en el propuesto por Bensen et al. (2007). La metodología IMASW consta fundamentalmente de tres fases: a) un pre-procesamiento básico de señales, que incluye filtros pasa-banda y blanqueamiento espectral para preparar los datos; b) la correlación cruzada del registro sísmico, de manera que entre todos los pares de geófonos disponibles se generan nuevas respuestas sísmicas, matemáticamente representadas por funciones de Green empíricas, obteniendo así, un registro sísmico multicanal de fuentes virtuales; y finalmente, c) el procesamiento MASW, todos los registros sísmicos se procesan con una metodología estándar MASW de fuentes activas.

En este caso de estudio, se utilizó el módulo de análisis FK lineal activo del software Geopsy para obtener los espectros de dispersión. Posteriormente, estos espectros son interpretados en función de detectar la curva aparente del modo fundamental de las ondas Rayleigh, y para ello, se interpretan los pares velocidad de fase-frecuencia del patrón dispersivo de máxima amplitud. De esta manera, se obtiene una curva de dispersión asociada a cada tendido. Para el procesamiento de los datos de ruido mediante el método ReMi, se utilizó el software M.A.S. desarrollado por Sánchez y Díaz (2018). El mencionado programa permite obtener un espectro de lentitud de fase vs frecuencia

mediante un análisis espectral basado en la transformada p-tau. Posteriormente, se realiza el picking para escoger la curva de dispersión, siguiendo la tendencia que marca la envolvente del modo fundamental de dispersión de onda Rayleigh, según el criterio del intérprete. En el caso de este estudio, se adoptó el criterio planteado por Louie et al. (2017).

Fase II: Análisis comparativo de las curvas de dispersión, proceso de inversión y cálculo del Vs30

Se realizó un análisis comparativo de las curvas de dispersión extraídas con distintos métodos: IMASW y ReMi obtenidas en este trabajo y las curvas ReMi del estudio de Parra (2012). Para establecer un criterio cuantitativo en la comparación de las curvas de dispersión, se realizó un análisis a partir del coeficiente de correlación de la velocidad de fase respecto a la frecuencia entre las mencionadas curvas. Para ello, fue necesario muestrear las curvas de dispersión en el mismo rango de frecuencia y así, obtener el coeficiente de correlación entre los conjuntos de datos para cada tendido. El coeficiente de correlación (valor estadístico acotado en el rango [-1,1]) indica el grado de relación y dependencia lineal entre dos variables y, por tanto, la correspondencia cuantitativa entre las curvas.

Con base a estudios antecedentes de la geología local tales como: la zonificación geotécnica del valle de Valencia de Holmquist y Ponce (1986) además de la información litológica de perforaciones SPT disponible, se elaboró una serie de modelos de parámetros geofísicos para realizar la inversión de las curvas de dispersión. El proceso de inversión se llevó a cabo mediante el módulo Dinver 2.9.0 del software GEOPSY, a partir de la parametrización propuesta asociada a un modelo geológico inicial de capas horizontales con variaciones en función de la profundidad. El algoritmo Neighbourhood (Wathelet, 2008) es la base funcional de este programa de inversión. Consecuentemente, se generó el perfil 1D de mejor ajuste (menor misfit). En la Figura 2, se aprecia la curva de dispersión y el perfil asociado para el tendido 42.

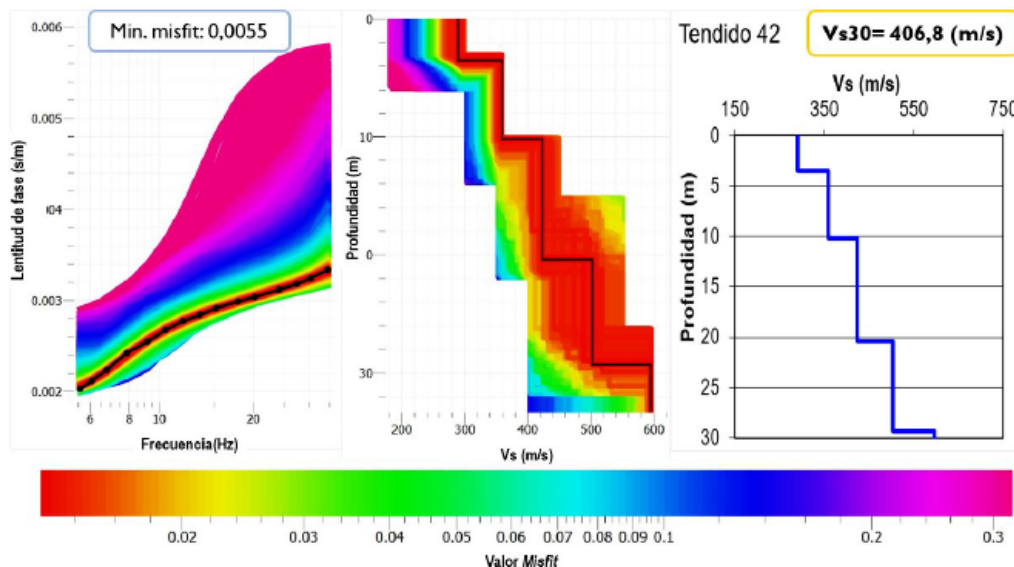


Figura 2. Ejemplo de curva de dispersión y modelo de Vs asociado. Resultado del proceso de inversión.

A partir de los modelos unidimensionales de Vs, se calculó el parámetro Vs30 de cada tendido mediante la expresión:

$$V_{s30} = \sum_{i=1}^n \frac{30}{\frac{h_i}{v_{s_i}}} \quad (1)$$

Dónde, V_{s_i} es la velocidad de las ondas S en el estrato i y h_i es el espesor del estrato i , ubicado dentro de los primeros 30 m del subsuelo. La expresión (1) está en el sistema de unidades MKS.

Fase III: Inventario de reportes geotécnicos, generación de perfiles estratigráficos y modelos 1D de NSPT-Vs

Para proceder con los reportes geotécnicos SPT, se elaboró un inventario reportando la ubicación, fecha, profundidad y litología de cada estrato. Se escogieron 10 perforaciones de acuerdo a su profundidad (mayor a 20 m) y de acuerdo a su conveniente proximidad a los tendidos sísmicos.

La información de estos ensayos geotécnicos permitió obtener perfiles 1D de NSPT-Vs a partir de la conversión empírica NEHRP (BSSC, 2003) reportada en León (2018). A partir de la información litológica se optó por realizar dos perfiles 2D para estimar la sección estratigráfica interpolada mediante el software *Strater 5*. En la Figura 3, se observan algunos de los perfiles litológicos derivados de los reportes geotécnicos SPT ubicados en el Municipio Naguanagua.

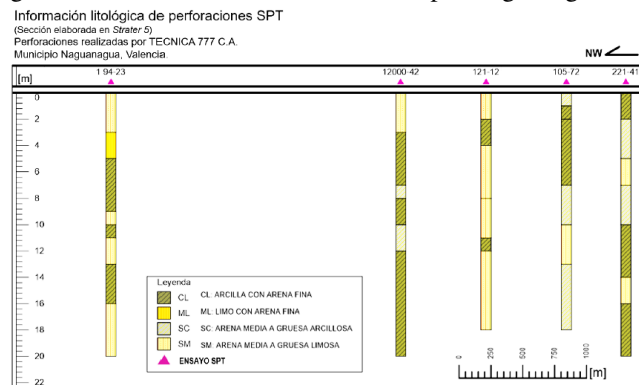


Figura 3. Perfiles litológicos ubicados en el Municipio Naguanagua derivados de información de perforaciones geotécnicas.

Para comprobar la pertinencia de los datos Vs30 de distintas metodologías, se consideró una muestra de las perforaciones de los datos de Márquez y Morales (2009) que estuvieran en una proximidad de un radio de al menos 100 a 500 m a los tendidos sísmicos, y se procedió a comparar estos valores con los Vs30-IMASW y los Vs30-ReMi de Parra (2012). Los resultados indicaron que, para perforaciones profundas (de al menos 20 m de profundidad), los valores Vs30 son relativamente similares, encontrando una diferencia promedio del 6,1 % entre los datos Vs30-NEHRP y Vs30-IMASW, y una diferencia promedio del 0,35 % entre los datos Vs30-NEHRP y Vs30-ReMi. Por consiguiente, se integraron 222 puntos Vs30-NSPT como datos válidos en el área de estudio, que representa alrededor del 17% del total de la base de datos de Márquez y Morales (2009), descartando las perforaciones con profundidad menor a 20 m.

Asimismo, se generó un mapa de Vs30 a partir de la interpolación de los datos geofísicos y los datos de índole geotécnica. Al determinar limitaciones para definir las clases de sitio debido a la escasa densidad de datos se generó un mapa de Vs30 integrando los valores por aproximación de la pendiente topográfica, de la metodología de Allen y Wald (2007), a partir del mapa de Vs30 reportado en Vernáez et al. (2011), de una resolución de 300 m (SRTM). En la Figura 4, se ubican los puntos de datos Vs30 de distinta índole que fueron utilizados para generar el mapa de Vs30 antes mencionado. Cabe destacar que, los resultados del Vs30 fueron clasificados de acuerdo a la norma sismorresistente venezolana COVENIN 1756 (COVENIN, 2019) (Tabla 1).

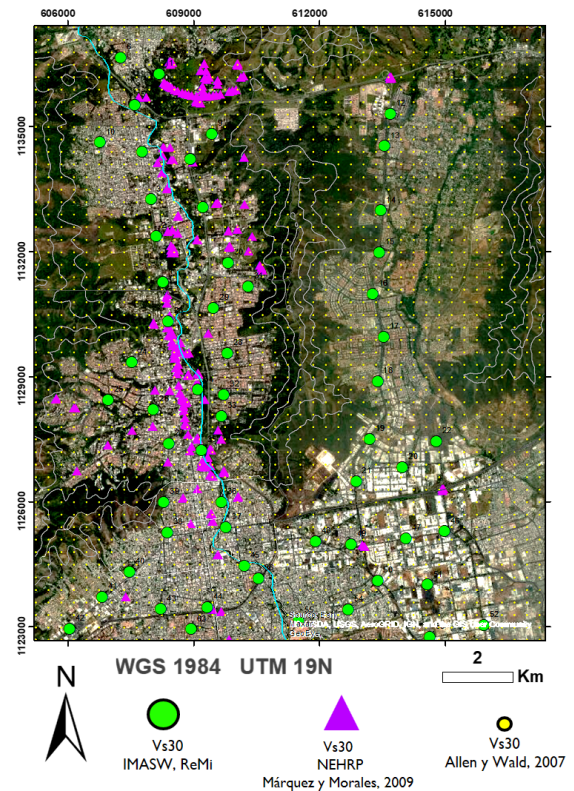


Figura 4. Ubicación de los datos de Vs30 utilizados.

Tabla 1. Clases de sitio de acuerdo a COVENIN (2019).

| Clase de sitio | Vs30 (m/s) | Descripción cualitativa |
|----------------|------------|--|
| DE | 170 a 200 | Entre clases D y E |
| D | 200 a 300 | Arenas o gravas densas; arcillas duras |
| CD | 300 a 400 | Entre clases C y D Roca blanda; |
| C | 400 a 650 | arenas o gravas muy densas; arcillas muy duras |
| BC | 650 a 850 | Entre clases B y C |
| B | 850 a 1300 | Roca dura o formación similar |

PRINCIPALES RESULTADOS

Curvas de dispersión

Para analizar de manera cualitativa las diferencias y comparaciones entre curvas de dispersión con diferentes métodos geofísicos, se compararon las curvas de dispersión de los métodos ReMi e IMASW obtenidas en este estudio y ReMi de Parra (2012). A partir de la comparación gráfica de las curvas mencionadas, se realizaron las siguientes observaciones:

- (a) En tendencia, las velocidades de fase de las curvas del método IMASW son mayores con respecto a las curvas del método ReMi y, por lo tanto, su posterior inversión supone un modelo de velocidades más altas.

- (b) De manera general, las curvas ReMi e IMASW extraídas en este estudio pueden derivar en un mayor alcance de profundidad y mayor resolución en las capas más someras y profundas del modelo de velocidad, ya que, poseen rangos más amplios en la zona de las bajas frecuencias entre 2-5 Hz y en las frecuencias mayores a 20 Hz, en comparación a las curvas de dispersión ReMi de Parra (2012).

- (c) Existe buena correspondencia entre las curvas ReMi de este estudio y las de ReMi de Parra (2012), es decir, se puede ratificar la validez de los métodos al obtenerse resultados similares mediante distintos programas e intérpretes, en rangos de frecuencia comparables. En la Figura 5, se observan gráficos comparativos de las curvas de dispersión con distintos métodos, para una muestra de tres tendidos.

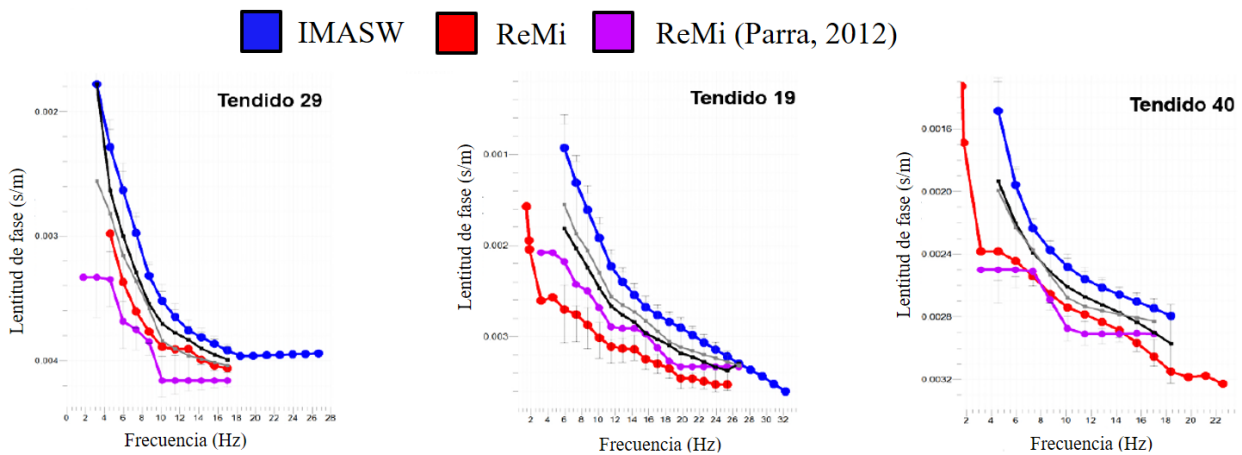


Figura 5. Muestra comparativa de curvas de dispersión obtenidas por distintos métodos: IMASW y ReMi.

Análisis comparativo y coeficiente de correlación de curvas de dispersión

Los resultados indican que aproximadamente 16% de los tendidos comparados obtuvieron una correlación de mala calidad (menor a 0,7) entre las curvas IMASW y ReMi de este estudio. Sin embargo, para la comparación de curvas IMASW y ReMi de Parra (2012) los resultados sugieren que 26% de los tendidos tienen una correlación considerada como débil. Por lo tanto, en general, las curvas IMASW y ReMi extraídas en este estudio poseen una correlación más robusta. De esta manera, la correlación débil entre estas curvas puede justificar si los posteriores perfiles 1D obtienen resultados contradictorios entre distintos métodos.

Del análisis comparativo por componente de frecuencia, el método IMASW posee más curvas con frecuencias en el rango de 1,8 a 7,3 Hz y 25,3 a 35 Hz, en comparación al método ReMi, por lo tanto, se estima que las curvas de dispersión IMASW pueden resolver de manera más certera tanto capas más someras y profundas. Para cuantificar la diferencia porcentual según cada componente de frecuencia, se calculó el promedio de estas diferencias para cada valor de frecuencia muestreada.

Se observó que existe una diferencia considerable en las velocidades de fase en el rango de las frecuencias bajas entre los métodos IMASW y ReMi, ya que, al menos en el rango de 1,8 a 6 Hz, las diferencias porcentuales varían en general entre 20 a 40% para la comparación entre curvas IMASW y ReMi de este estudio.

Sin embargo, la diferencia porcentual en el picking de las velocidades de fase disminuye a medida que aumenta la frecuencia, y de esta manera, las curvas son más similares al menos en el rango de 10,1 a 25,3 Hz, donde las diferencias varían en general entre 10-20%. De manera general, se infiere que los perfiles 1D derivados de las curvas de dispersión de distintos métodos tendrán diferencias en los valores de velocidad de ondas de corte en estratos profundos y pueden resolver modelos de velocidad similares para profundidades más someras.

Perfiles 1D de Vs

De los 64 tendidos sísmicos, se obtuvieron 49 perfiles con modelos de velocidad creciente con la profundidad y 15 perfiles con capas de baja velocidad en profundidad. En general, el método IMASW fue la técnica preferencial, sin embargo, se optó por utilizar la curva de dispersión derivada

del método ReMi en los casos donde no fue posible extraer la curva de dispersión IMASW debido a la falta de fiabilidad de la tendencia dispersiva en el espectro. La inversión de las curvas de dispersión obtuvo un error asociado al valor mínimo residual (*min misfit*) no mayor al 0,03 para todos los tendidos en cuestión.

Además, los mencionados perfiles 1D obtuvieron una profundidad objetivo de alrededor de 27-32 m, lo que fue un resultado adecuado para estudiar la profundidad de investigación. Los perfiles con descensos de velocidad en profundidad, en general, están ubicados al sur de la cuenca del río Cabrales con capas de baja velocidad en los estratos someros entre los 5-15 m de espesor. También, en la planicie sur de la ciudad estas capas se encuentran en los estratos más profundos, entre los 20-30 m de profundidad. En la e muestra la distribución de los perfiles de Vs de acuerdo a los resultados de los tipos de modelos de velocidad y los tendidos donde el método ReMi fue más propicio.

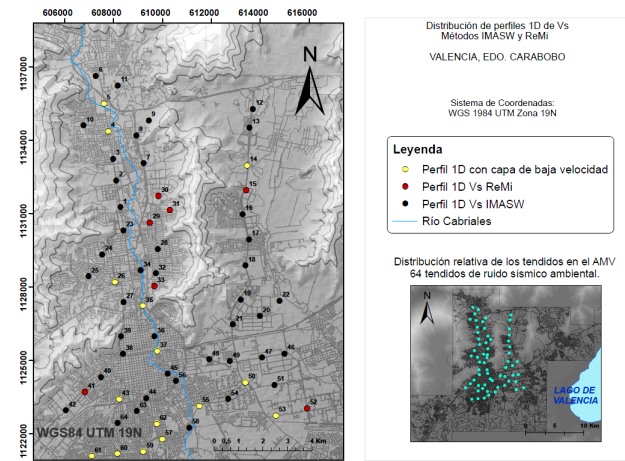


Figura 6. Distribución de los perfiles 1D de Vs de acuerdo al método utilizado por tendido. Se indican los perfiles 1D que arrojaron modelos con capas de baja velocidad.

Las capas de baja velocidad en estratos superficiales se asocian a la hidrografía circundante, representada principalmente por la llanura aluvial del río Cabrales. Existe una coincidencia geográfica de la tendencia de capas de baja velocidad con la proximidad al río Cabrales específicamente en los tendidos 4, 5, 26, 35 y 37 (Figura 6).

De acuerdo a la zonificación geotécnica de la cuenca del río Cabrales de Holmquist y Ponce (1986), los tendidos 4 y 5 estarían ubicados en una Zona I (SP-SM) a Zona II (CL-ML) en la región más central de la cuenca del río, y el descenso en las velocidades se atribuye a los suelos granulares mal gradados compuestos principalmente por arenas con contenido de limos, que en general son más porosos y menos densos que los suelos arcillosos superficiales.

De manera congruente, Holmquist y Ponce (1986) afirman que los suelos de este tipo poseen una consistencia blanda a media, por lo que se interpreta que la disminución de velocidad se asocia al litotipo de estos estratos, sedimentos del tipo aluvial o fluvial, que posteriormente fueron soterrados por sedimentos más finos como arcilla a limos

por una eventual crecida del cauce cubriendo la llanura aluvial del río.

Adicionalmente, estos estratos pueden estar relacionados con el nivel freático, ya que, según este autor en estas zonas geotécnicas se pueden encontrar acuíferos superficiales, entre los 10 a 15 m. En la Figura 7 se muestran ejemplos de este tipo de modelo de velocidad donde la velocidad descende con la profundidad en los estratos superficiales.

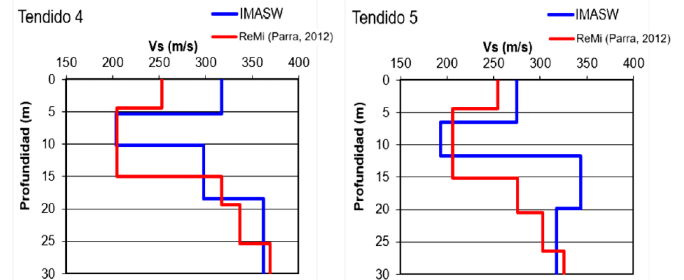


Figura 7. Modelos 1D de Vs que coinciden con capas de baja velocidad, según resultados del método IMASW y el estudio ReMi de Parra (2012).

La interpretación de las capas de baja velocidad en los estratos más profundos, resultado obtenido en los modelos 1D de Vs ubicados en la planicie sur de la ciudad, se atribuye posiblemente a estratos de sedimentos diatomáceos que se depositaron en las planicies adyacentes al lago de Valencia, en un período de transgresión lacustre hacia el fin del pleistoceno, similar a la fase III de extensión lacustre de Peeters (1968).

De este modo, constituyen los suelos conocidos como "tierra de diatomeas", de características homogéneas con baja densidad relativa y alto porcentaje de porosidad (Hernández, 2006; López, 2009), propiedades físicas que explican los descensos de velocidad en los modelos 1D de Vs hacia el sur de la ciudad de Valencia. Consecuentemente, se interpreta que estos suelos diatomáceos fueron soterrados por sedimentos aluviales asociados a la desecación lacustre de edad Holoceno-presente (fase IV del lago de Valencia) (González de Juana et al. (1980)), que se relacionan a los suelos calcáreos de origen orgánico, identificados como "suelos de caracolilloz materia orgánica no descompuesta (turba), que en congruencia con Hernández (2006), se encuentran sobre los depósitos de "tierras de diatomeas", y según este autor están principalmente formados por arenas finas y limos, altamente porosos y ricos en materia orgánica, en algunos puntos intercalados con lentes de arena.

Perfiles 2D de Vs

A partir de los perfiles 1D de Vs se elaboraron perfiles 2D de Vs interpolados en secciones transversales de sentidos Norte-Sur y Este-Oeste. Fue posible distinguir el comportamiento de la velocidad de ondas de corte a profundidades someras y estimar el contenido sedimentario de las capas, según la geología local consultada. A continuación, se describen tres perfiles 2D de Vs (Perfil 1 N-S, Perfil 2 N-S y Perfil 3 E-W) ubicados respectivamente en el valle del Cabrales, en el valle de San Diego y en la planicie sur de la ciudad:

El Perfil 1 se muestra en la [Figura 8](#), cruza en dirección norte-sur a la ciudad de Valencia atravesando su valle occidental por los municipios Naguanagua al norte y Valencia hacia el sur, siguiendo de manera aproximada el cauce del río Cabriales. En el perfil se distingue la diferenciación de tres capas con velocidades tope de 320, 400 y 500 m/s aproximadamente, a lo largo del perfil. A partir de estas velocidades y la estratigrafía consultada de perforaciones geotécnicas disponibles, es posible asociar las velocidades de este perfil a sedimentos finos a gruesos con clasificaciones geotécnicas entre SP-SM (arenas), ML (limo) y CL (arcilla con arena fina), por lo que se relacionan los estratos superficiales con sedimentos más blandos y

menos compactados, posiblemente de granulometría arena media, asociadas al cauce del río Cabriales, de manera que a mayor profundidad se pudiesen encontrar granulometrías más finas, asociadas a sedimentos más compactados. Se observa que los cruces con el cauce del río Cabriales en el sur, corresponden con aumentos repentinos en el espesor de la capa más superficial asociada previamente a sedimentos SM, menos compactados y de densidades bajas, lo que se considera coherente, ya que, es probable que la llanura aluvial del Cabriales contenga sedimentos de este tipo en los primeros metros de profundidad (10-15m), en congruencia con la descripción de la zona geotécnica I y II propuesta por [Holmquist y Ponce \(1986\)](#).

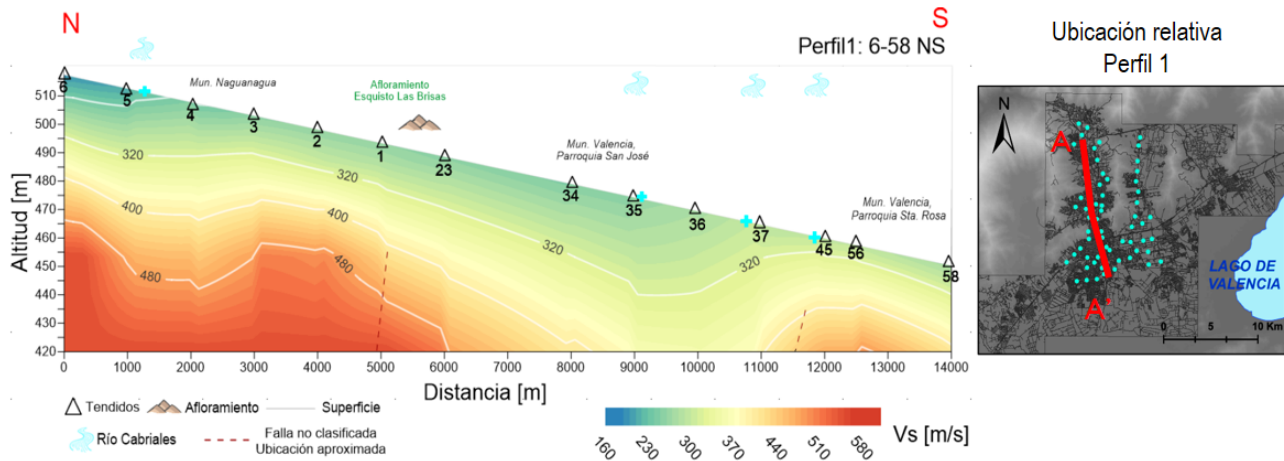


Figura 8. Perfil 1 A-A'. Sección transversal N-S ubicada en el valle del Cabriales, al oeste de la ciudad de Valencia.

El perfil 2 ([Figura 9](#)), cruza en dirección N-S a la ciudad de Valencia, atravesando desde su valle oriental (Municipio San Diego) hasta zonas de la parroquia Urdaneta en el Municipio Valencia. Se observan velocidades más altas en los estratos más someros, en comparación al perfil 1, por lo que se interpreta menor espesor de sedimentos blandos, lo que puede deberse al hecho de que en este perfil no se ubican cruces con cauces de ríos, y además los cursos de agua en el

valle de San Diego son de menor importancia, por lo que las capas más superficiales pueden relacionarse a sedimentos más compactados con grano más fino, en comparación a los del valle de Valencia. Además, conforme a la información litológica de perforaciones SPT disponibles en esta zona, los estratos más superficiales (entre 8-10m de profundidad) se relacionan con sedimentos CL (arcilla con arena fina), lo que es congruente con las velocidades presentes.

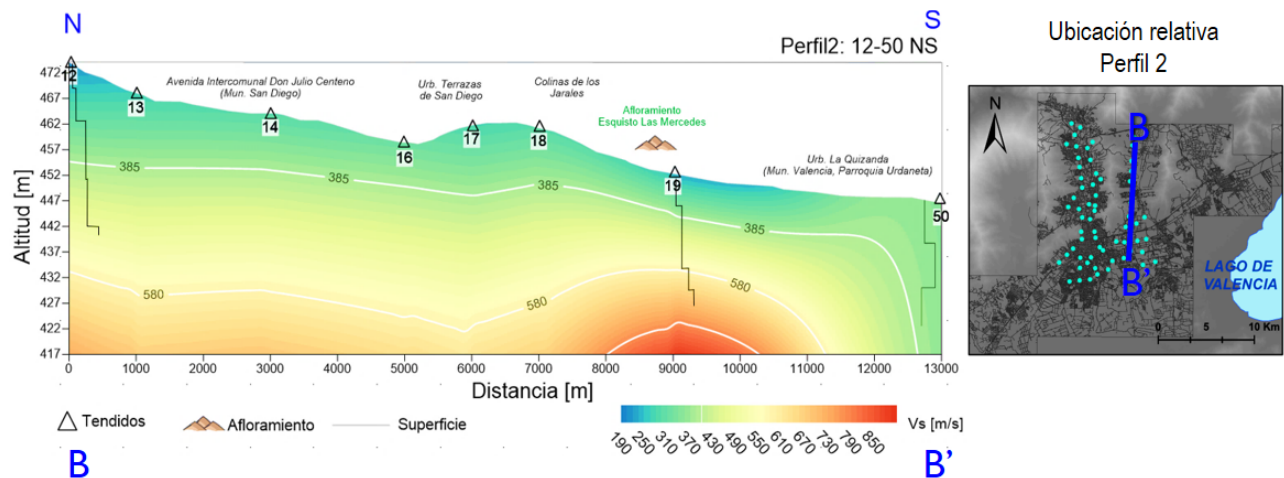


Figura 9. Perfil 2 B-B'. Sección transversal N-S ubicada en el valle de San Diego, al este de la ciudad de Valencia.

El perfil 3, de una orientación OSO-ENE (Figura 10), atraviesa el tendido 42 al 46 y se ubica en la planicie sur de la ciudad. En este perfil se distingue una primera capa superficial con Vs tope de 380 m/s que se interpreta como sedimentos blandos, granulares, poco compactados, de origen aluvial-lacustre, cuyo espesor aumenta en sentido este en dirección a la llanura del lago de Valencia. Alrededor de la parroquia Miguel Peña, se distingue un perfil del

tipo de capas de baja velocidad en estratos profundos, que se atribuye a presencia de material sedimentario menos denso de origen orgánico-lacustre. Además, se observa que el espesor de la capa de sedimentos blandos disminuye en sentido WSW, en dirección contraria al lago, donde justamente afloran los Esquistos Las Mercedes, lo que es congruente con el aumento puntual de Vs en profundidad para esa zona.

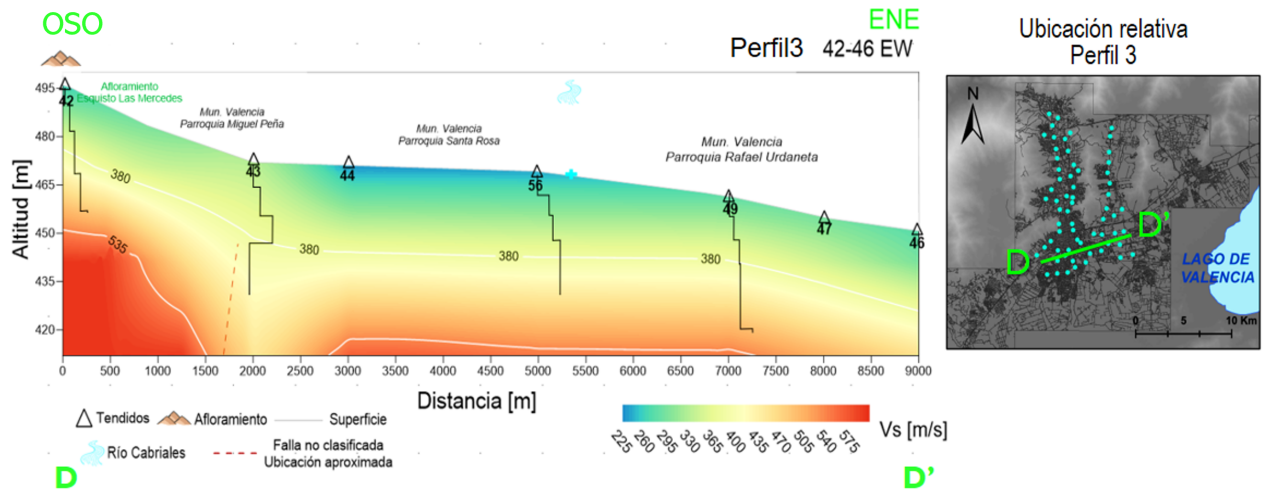


Figura 10. Perfil 3 D-D'. Sección transversal WSW-ENE ubicada en la planicie sur de la ciudad adyacente al lago de Valencia.

Secciones estratigráficas

Sección 1-SPT Naguanagua

En la Figura 11 se muestra la sección 1-SPT ubicado al este del Municipio Naguanagua, derivada de la información litológica de reportes geotécnicos. Los perfiles de Vs-NSPT calculados con la relación NEHRP se muestran superpuestos a la sección. En esta sección se distingue una secuencia lateral predominante del litotipo SM (arena media a gruesa limosa) para estratos superficiales con profundidad máxima de 3 m.

Este estrato disminuye su espesor hacia el sureste encontrándose con capas de sedimentos tipo SC (arena

media a gruesa arcillosa). De manera general, en toda la extensión del perfil predomina el litotipo CL (arcilla con arena fina) para profundidades mayores a 3-5m, con estratos de arena intercalados en toda la sección, aunque en menor medida hacia el norte.

Además, los perfiles de velocidad muestran una tendencia general de aumento de la velocidad en profundidad, y se aprecian pocas capas de baja velocidad, que se asocian con estratos de menor compactación y/o densidad, lo que es congruente con la sección litológica en cuestión, ya que, tienden a ocurrir en las interfases de arcilla a arena donde disminuye el número N (resistencia a la penetración) del ensayo SPT.

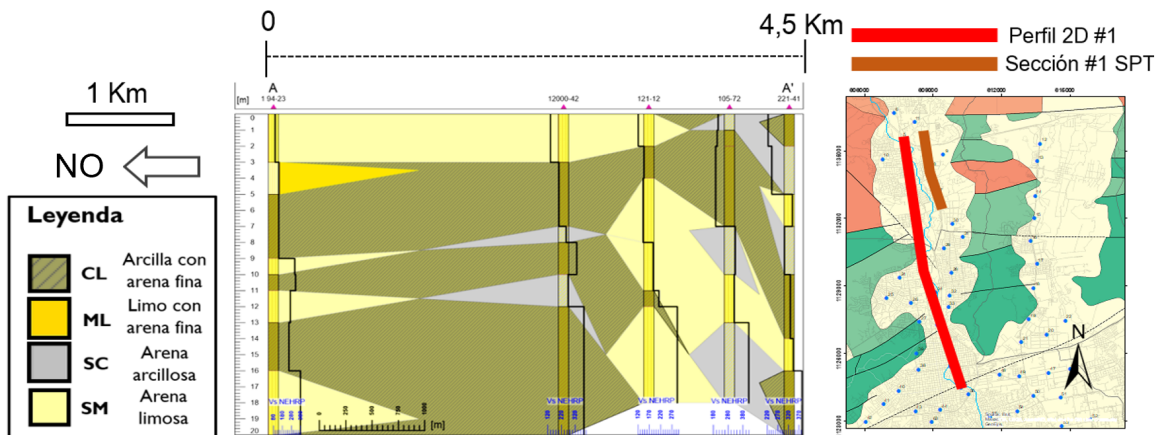


Figura 11. Sección 1-SPT de 5 perforaciones de una profundidad de 20 m (Municipio Naguanagua), con ubicación relativa. Se indican litotipos en base al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Sección 2-SPT San Diego

En la Figura 12 se muestra la sección 2-SPT ubicada en el Municipio San Diego, al oeste de la ciudad y una profundidad limitada de 8 m de profundidad. El perfil muestra una tendencia estratigráfica monótona en toda la sección, en donde predomina el litotipo CL (arcilla con arena fina), con capas de arena media a gruesa (SC-SM) de máximo 1 m de espesor para los estratos más superficiales.

Del perfil se observa que los modelos de velocidad son siempre crecientes con la profundidad, lo que se relaciona con la disminución del tamaño de grano (sedimentos más densos) y el aumento de la compactación de los estratos en profundidad. De esta manera, se encuentra que en esta zona del Municipio San Diego, se estiman capas superficiales con sedimentos de granulometría fina (arcilla con arenas finas), con velocidades de ondas de corte (V_s -NEHRP) de alrededor de 300 m/s.

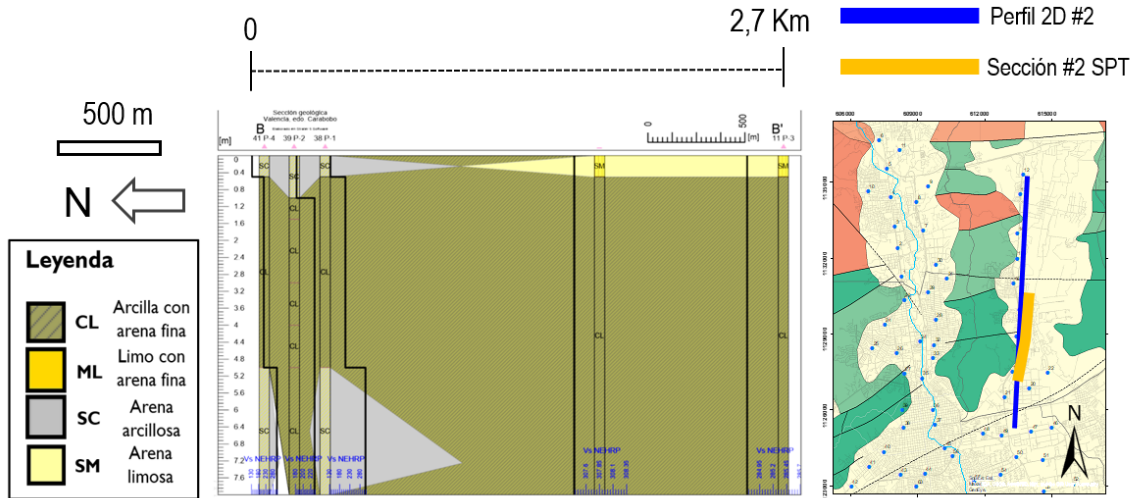


Figura 12. Sección 2-SPT de 5 perforaciones de una profundidad de 8 m (Municipio San Diego), con ubicación relativa.

Integración de los resultados y estimación de modelos geológicos

Valle del Cabriales (valle oeste)

En el valle occidental de Valencia se obtuvieron perfiles 1D de con capas de baja velocidad en estratos someros aproximadamente en los 5-15 m de profundidad, específicamente en los tendidos 4 y 5, ubicados en el cauce alto del río Cabriales. El descenso de velocidad se atribuye a los suelos granulares mal gradados compuestos principalmente por arenas con contenido de limos, que en general son más porosos y menos densos que los suelos arcillosos superficiales, de potencial acuífero y que de acuerdo a la zonificación geotécnica de la cuenca Cabriales de Holmquist y Ponce (1986), se afirma que son depósitos de consistencia blanda a media y con las menores densidades en estratos de 10 a 15 m, asociado a sedimentos del tipo aluvial o fluvial, que posteriormente fueron soterrados por sedimentos más finos como arcilla a limos por una eventual crecida del cauce cubriendo la llanura aluvial del río. A partir del perfil 2D de V_s , que cruza de N a S el valle del Cabriales, siguiendo aproximadamente el cauce del río, se estima una capa superficial de espesor entre 15-20 m con una V_s tope estimada de 320 m/s, que se interpreta como suelos granulares SM-SP derivados de la vega del río Cabriales; estos se asocian a las zonas I y II, de la zonificación geotécnica de la cuenca del río de acuerdo a Holmquist y Ponce (1986), que en congruencia con la sección estratigráfica confirman la existencia de estos litotipos.

Valle de San Diego (valle este)

El perfil 2D de V_s ubicado en este valle muestra una primera capa superficial con una V_s que alcanza los 385 m/s, esta capa se relaciona con sedimentos más densos o compactados que los del valle del Cabriales. De la sección estratigráfica ubicada en el Municipio San Diego se obtuvo una tendencia monótona donde predomina el litotipo CL (arcilla con arena fina), con capas de arena media a gruesa (SC-SM) de máximo 1 m de espesor para los estratos más superficiales. Del perfil se observa que los modelos de velocidad son siempre crecientes con la profundidad, lo que se relaciona con la disminución del tamaño de grano (sedimentos más densos) y el aumento de la compactación de los estratos en profundidad. También, se encuentra un comportamiento monótono de la V_s -NSPT entre 284-307 m/s. De esta manera, se propone un modelo geológico de capas superficiales entre 8-10m con sedimentos de granulometría fina (arcilla con arenas finas), con velocidades de ondas de corte de alrededor de 300 m/s hasta 385 m/s.

Planicie lacustre (sur de la ciudad)

En la zona meridional del área de estudio, hacia la planicie lacustre en sentido sureste, se encuentran modelos de V_s con capas de baja velocidad en los estratos más profundos (capas entre los 20-30 m de profundidad), que se interpretan como sedimentos diatomáceos de origen orgánico, que fueron soterrados por los depósitos aluviales asociados a la desecación lacustre del lago de Valencia de edad Holoceno - presente (Peeters, 1968); estos depósitos

aluviales se relacionan con los llamados "suelos de caracolillo"(Planorbis Sp), formados por arenas finas y limos, altamente porosos y ricos en materia orgánica y cochas de Planorbis o çaracolillo", sedimentos calcáreos y materia orgánica no descompuesta (turba), que en congruencia con [Hernández \(2006\)](#), se encuentran suprayacentes a los depósitos conocidos como "tierras de diatomeas", suelo de material muy fino, de color gris claro, que se identifica por una alternancia irregular de capas de arcillas, limos, arenas y gravas de granulometría variable.

Este suelo diatomáceo es de baja densidad relativa y alto porcentaje de porosidad. Cabe destacar que, ambos depósitos han sido estudiados por su propensión a la saturación y al fenómeno de colapso por autores como [Heredia \(1984\)](#) quien estudia profundamente este fenómeno de colapso en los suelos diatomáceos del lago de Valencia e indica que esto sucede con frecuencia en los suelos granulares con alto contenido de "caracolillo" de las planicies del lago. Adicionalmente, [Hernández \(2006\)](#) estudia los suelos del lago de Valencia, específicamente su inclinación al colapso e hinchamiento de las arcillas expansivas, de tal manera que, afirma que el fenómeno de colapso es el más importante en esta zona de estudio y depende directamente del grado de saturación del estrato y la carga a la que se somete.

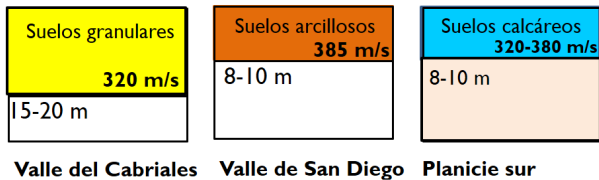


Figura 13. Modelos geológicos estimados para tres zonas geomorfológicas del área de estudio: valle del río Cabriales, valle de San Diego y la planicie lacustre al sur de la ciudad.

Mapa de Vs30 y clasificación de sitio

Se elaboró un mapa preliminar de Vs30 que contó con los resultados obtenidos del método IMASW, ReMi y Vs30-NEHRP. Se determinaron limitaciones para definir las clases de sitio, específicamente al este del valle de San Diego, debido a la escasa densidad de datos. Consecuentemente, se elaboró un mapa de Vs30 integrando los valores por aproximación de la pendiente topográfica de técnica de [Allen y Wald \(2007\)](#) que resultó ser el más propicio para realizar la clasificación de sitio del área de estudio.

De este mapa ([Figura 14](#)) se puede observar que el parámetro Vs30 disminuye hacia el centro de los valles, donde se encuentran los valores de Vs más bajos, especialmente en las adyacencias de la vega del río Cabriales, tanto en su cauce alto como en su cauce bajo, así como en ciertas zonas de la planicie lacustre. De manera congruente, se observan aumentos de velocidad a favor de la pendiente topográfica, hacia los afloramientos rocosos de los estribos montañosos que dividen los valles de la ciudad de Valencia. El Vs30 es de tendencia monótona hacia el sur del valle de Valencia en toda la planicie aluvial del río Cabriales y en sentido sureste, hacia la conexión con la planicie lacustre del lago de Valencia.

Los valores de Vs30 asociados a cada modelo 1D de Vs fueron clasificados mediante la norma venezolana COVENIN 1756 ([COVENIN, 2019](#)), esta clasificación por tendido se observa en la [Figura 15](#); se obtuvo que, en los perfiles ubicados en el valle de San Diego domina la clase de sitio C (Vs30 entre 400-650 m/s) y CD, la clase D (Vs30 entre 200-300 m/s) y CD en la cuenca del río Cabriales y la clase CD (Vs30 entre 300-400 m/s) en los perfiles ubicados al sur de la ciudad.

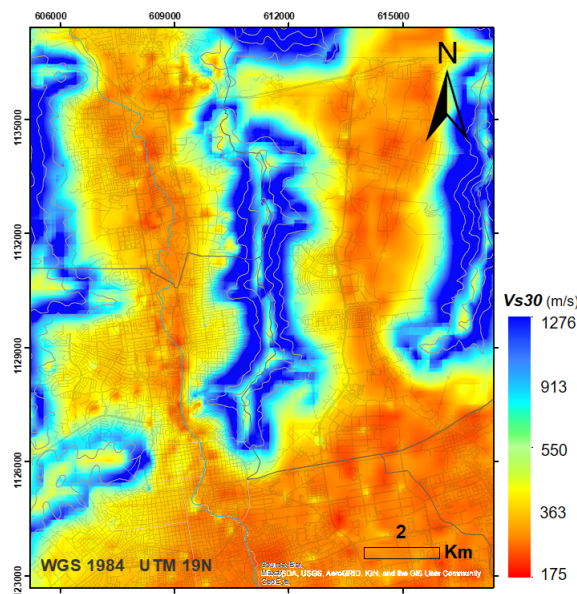


Figura 14. Mapa de Vs30 interpolado integrando los valores de Vs30 disponibles de distintos métodos: IMASW, ReMi, Vs-NSPT y Vs30 por pendiente topográfica.

De acuerdo a la clasificación de sitio del mapa Vs30 integrado (Figura 15) se obtuvo que en los suelos del área de estudio domina la clase de sitio D, tanto en los centros de los valles aluviales como hacia la planicie lacustre. Hacia

los estribos montañosos, las clases de sitio varían de CD hasta C. Las clases B y BC (Vs30 > 650 m/s) se obtienen específicamente en los altos topográficos que, en general, son áreas montañosas no urbanizadas.

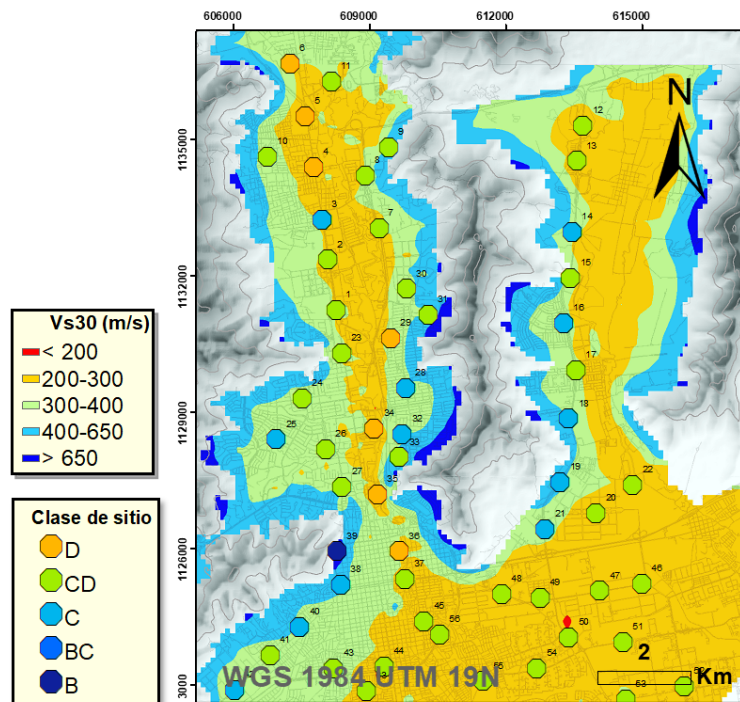


Figura 15. Clasificación de sitio del área de estudio. La clase de sitio D (200-300 m/s) es predominante.

CONCLUSIONES

El método IMASW logró recuperar un mayor número de curvas de dispersión en el rango de las bajas frecuencias, en comparación al método ReMi, lo que permite obtener mejor resolución y mayor certeza en el detalle de los estratos profundos en los modelos de velocidad. Además, la integración de otros métodos resultó clave para calibrar y verificar la calidad de los resultados. A partir de los modelos de velocidad y la información geotécnica, se estimaron modelos geológicos de las capas superficiales del área de estudio donde se interpretó la presencia de sedimentos de origen aluvial a lacustre.

El estudio de los modelos de velocidad en conjunto con la geología local permitió deducir la presencia de suelos con tendencia al colapso y al fenómeno de licuación. En los valles aluviales del área de estudio (valle del Cabriales y valle de San Diego), se corroboró la presencia de los litotipos arena limosa (SM) y arena arcillosa (SC) gracias a la información litológica derivada de perforaciones geotécnicas. Los mencionados sedimentos, en condiciones de saturación o cercanía al nivel freático, como es el caso de los sedimentos de la llanura aluvial del Cabriales y en las adyacencias del lago, representan un potencial de licuación importante y se ubica en estratos de profundidad menor o igual a 5 m, según lo afirma Pombo (2018). En

la planicie lacustre, adyacente a las llanuras del lago de Valencia, se encontraron congruencias entre los modelos de velocidad y las propiedades del contenido sedimentario descrito en la literatura.

Las capas de baja velocidad ubicadas a profundidades entre los 15-30 m, se relacionan con sedimentos diatomáceos de origen lacustre debido a sus características de baja densidad relativa y alta porosidad. Estos depósitos son conocidos como "tierras de diatomeas". Las capas suprayacentes se relacionan con otro tipo de suelo lacustre relacionado al llamado "caracolillo", cuyas capas someras de mayor velocidad se interpretan de un contenido sedimentario más fino y calcáreo, vinculado a la última desecación del Lago de Valencia (Holoceno-presente).

En congruencia con Hernández (2006), los llamados "suelos de caracolillo" se encuentran sobre los depósitos de "tierras de diatomeas". Cabe resaltar que, diversos autores relacionan este tipo de sedimentos, tanto sedimentos diatomáceos como los suelos calcáreos de caracolillo, con suelos colapsables por saturación, por lo que se infiere que estas zonas pueden relacionarse con suelos potencialmente licuables, debido a que son propensos a la saturación y la granulometría de los sedimentos está relacionados a este tipo de fenómeno.

El mapa de Vs30 integrado permitió determinar que en los suelos del área de estudio domina la clase de sitio D (200-300 m/s), tanto en los centros de los valles aluviales como hacia la planicie lacustre. Hacia los estribos montañosos, las clases de sitio varían de CD hasta C.

RECOMENDACIONES

En estudios geofísicos de esta índole, se ratifica la urgencia de la actualización de la norma sísmica vigente 1756 de COVENIN (2001), ya que, juega un rol fundamental en la definición de microzonas y, por ende, en la ejecución prudente de las obras civiles y urbanísticas en Venezuela.

AGRADECIMIENTOS

Contribución al proyecto Investigaciones aplicadas a la gestión integral del riesgo en espacios urbanos (FONACIT 2007000939). Agradecemos a Javier Parra por la ayuda y el tiempo involucrado en la elaboración de este proyecto.

REFERENCIAS

- ALLEN, T. & WALD, D. (2007). *Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site-Conditions (Vs30) and Amplification Around the globe*. Open-File Report 2007-1357, R. U.S. Geological Survey, Virginia.
- AUDEMARD, F. (2014). Active Block Tectonics in and around the Caribbean: A review", In M. Schmitz, F. Audemard, F. Urbani, (Eds). *El Límite Noreste de la Placa Sudamericana - estructuras litosféricas de la superficie al manto* (p. 29-77). Editorial Innovación Tecnológica, Caracas, Venezuela.
- BENSEN, G. D., RITZWOLLER, M. H., BARMIN, M. P., LEVSHIN, A. L., LIN, F., MOSCHETTI, M. P., SHAPIRO, N. M., & YANG, Y., (2007). Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements", *Geophysical Journal International*, 169(3), 1239-1260.
- BORCHERDT, R. (2012). VS30 - A Site-Characterization Parameter for Use in Building Codes, Simplified Earthquake Resistant Design, GMPES, and ShakeMaps, Conference: *15th World Conf. on Earthquake Engineering* (15 WCEE Lisboa), 2 pp.
- BSSC (2003). NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA 450), *Building Seismic Safety Council (BSSC)*, Washington, D.C., USA.
- COVENIN (2019). Norma venezolana COVENIN 1756-1:2019, Construcciones sismorresistentes. Parte 1: Requisitos (2da. Revisión), Comisión Venezolana de Normas Industriales, FODENORCA, Caracas, <http://www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/1756-1-2019.pdf>
- GONZÁLEZ DE JUANA, C., ITURRALDE, J., & PICARD, X. (1980). *Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas*, Ediciones Foninves, Caracas, pp. 1031.
- HEREDIA, J. (1984). *Comportamiento mecánico de suelos en la zona sur de Maracay* [Trabajo de Ascenso]. Instituto Universitario de Tecnología Antonio José de Sucre.
- HERNÁNDEZ, M. (2006). *Estudio geológico y reconocimiento de arcillas expansivas en suelos de una zona al sur de Maracay, Estado Aragua*. [Tesis de Pregrado]. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela, 152 pp.
- HOLMQUIST, J., & PONCE, C. (1986) . *Propiedades geotécnicas del subsuelo y estudio de las soluciones de fundación comúnmente usadas en el Área Metropolitana de la Ciudad de Valencia y sus alrededores: zona industrial y Valle de San Diego*. [Tesis de Pregrado]. Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela.
- LEÓN, A. (2018). *Generación de mapas de VS30 y microzonas sísmicas en el Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador*. [Tesis de Pregrado]. Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela, 190 pp.
- LÓPEZ, J. (2009). Comportamiento cíclico de suelos diatomáceos. [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, 292 pp.
- LOUIE, J. (2001). Faster, Better: shear-wave velocity to 100 meters' depth from refraction, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(2), 347-364.
- LOUIE, J., PANCH, A., & PULLAMMANAPPA-LLIL, S. (2017). Applications of Refraction Microtremor Done Right, and Pitfalls of Microtremor Arrays Done Wrong, *16th World Conference on Earthquake Engineering (16WCEE)*, Santiago, Chile, 9 pp.
- MÁRQUEZ, J., & MORALES, M. (2009). Elaboración de Mapa de Velocidad de Ondas de Corte Vs-30, a partir de base de datos existente y nueva del Área Metropolitana de Valencia. [Tesis de Pregrado], Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 172 pp.
- O'CONNELL, D., & TURNER, J. (2011). Interferometric Multichannel Analysis of Surface Waves (IMASW), *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(5), 2122 - 2141.
- PARK, C., MILLER, R., & XIA, J. (1999). Multichannel Analysis of Surface Waves, *Geophysics*, 64(3), 800-808.

- PARRA, J. (2012). Caracterización Geofísica del Subsuelo Somero Mediante la Aplicación del Método de Refracción por Microtremores (ReMi) en la Ciudad de Valencia, Estado Carabobo [Tesis de Pregrado]. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 90 pp.
- PEETERS, L. (1968). *Origen y evolución de la cuenca del lago de Valencia, Venezuela*. Caracas: Instituto para la Conservación del Lago de Valencia, 66 p.
- POMBO, A. (2018). Riesgo Sísmico en el Área Metropolitana de Valencia [Tesis Doctoral] Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 190 pp.
- SÁNCHEZ, J., & DÍAZ, D. (2018). Programa en MatLab para el procesamiento de datos de Refracción de Microtremores (ReMi), Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- SCHMITZ, M., CANO, V., LÓPEZ, O. A., KLARICA, S., POMBO, A., DÍAZ, J. F., HEREDIA, J., AVENDAÑO, J., MORALES, C., & EL GRUPO DE RIESGO SÍSMICO DEL PROYECTO INVESTIGACIÓN APLICADA A LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RIESGO EN ESPACIOS URBANOS (2015). Estudios Geofísicos en Cuencas Urbanas en Venezuela con fines de Microzonificación Sísmica, *Boletín de Geología*, 37(1), 17-26.
- VERNAÉZ, G., CANO, V., SCHMITZ, M., MANCHEGO, M., SALCEDO, A., COURTEL, F. & SANZONETTI, J. (2011). *Informe técnico de avance correspondiente al Segundo Año del Proyecto de Investigación Aplicada a la Gestión Integral del Riesgo en Espacios Urbanos* (FONACIT 2007000939), FUN 012-2011, 229 pp.
- WATHELET, M. (2008). An improved neighborhood algorithm: parameter conditions and dynamic scaling, *Geophysical Research Letters*, 35(9), 1-5. <https://doi.org/10.1029/2008GL033256>