

Caracterización dinámica de depósitos aluviales mediante geofísica y ensayos especializados en Floridablanca, Santander, Colombia

Dynamic characterization of alluvial deposits by geophysics and specialized tests in Floridablanca, Santander, Colombia

Msc. Carlos Andrés Buenahora Ballesteros¹, PhD Antonio Miguel Martínez Graña²,
Ing. Laura Julieth Ortiz-Barón³

¹ E.D Ingeotecnia S.A.S, Colombia, Email: director@ingteocnia.com.co, Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-9497-9185>

² USAL, España, Email: amgranna@usal.es, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2242-5192>

³ E.D Ingeotecnia S.A.S, Colombia, Email: lortiz.ingteocnia@gmail.com, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5366-3786>

Cómo citar: C.A. Buenahora-Ballesteros, A.M. Martínez-Graña y L.J. Ortiz-Barón, "Caracterización dinámica de depósitos aluviales mediante geofísica y ensayos especializados en Floridablanca, Santander, Colombia", Rev. Ingenio, vol. 23, n°1, pp. 1-10, 2025, doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.4700>

Fecha de recibido: 10 de febrero de 2025
Fecha aprobación: 05 de mayo de 2025

RESUMEN

Palabras clave:

Bender element, caracterización dinámica, down hole, espectro, triaxial cíclico, sísmica.

El área Metropolitana de Bucaramanga se localiza dentro uno de los tres nidos sísmicos del mundo y, por tanto, presenta una amenaza sísmica y geotécnica alta, por consiguiente, las zonas que cuentan con depósitos aluviales y coluviales, tienen limitaciones para el desarrollo de proyectos de infraestructura, a menos que se realice una evaluación de amenaza que indique lo contrario o con obras de estabilización. Conocer el comportamiento dinámico (coeficiente de amortiguamiento y las curvas de degradación del terreno), permitiría realizar análisis con modelos constitutivos especiales y no lineales para conocer mejor su respuesta ante un posible sismo. Un proyecto de vivienda de hasta de 36 niveles de altura, constituye un escenario perfecto para llevar a cabo un estudio de respuesta sísmica local. Cabe notar que, dada la aceptable rigidez y composición granular de los suelos, dificultad de toma de muestras inalteradas y la norma colombiana NSR-10 no exige estudios de comportamiento local y por tanto su estudio no ha sido propiamente establecido. Se busca a través de ensayos geofísicos y ensayos de laboratorio como triaxiales, columna resonante y bender element realizar dicha caracterización y realizar modelaciones del suelo que permita al ingeniero calculista contar con los insumos adecuados para sus análisis.

ABSTRACT

Keywords:

Bender element, cyclic triaxial, dynamic characterization, down hole, seismic, spectrum.

The Bucaramanga Metropolitan Area is located within one of the three seismic nests in the world and, therefore, presents a high seismic and geotechnical threat, therefore, areas with alluvial and colluvial deposits have limitations for the development of infrastructure projects, unless a threat assessment is carried out to the contrary or with stabilization works. Knowing the dynamic behavior (damping coefficient and terrain degradation curves) would allow analysis with special non-linear constitutive models to better understand their response to a possible earthquake. A housing project of up to 36 stories high is a perfect scenario to carry out a local seismic response study. It should be noted that, given the acceptable stiffness and granular composition of the soils, it is difficult to take undisturbed samples and the Colombian NSR-10 standard does not require local behavior studies and therefore its study has not been properly established. It is sought through geophysical tests and laboratory tests such as triaxial, resonant column and bender element to perform such characterization and perform soil modeling that will allow the calculation engineer to have the appropriate inputs for their analysis.

1. Introducción

Colombia está ubicada sobre la placa suramericana y está rodeada por la placa Nazca y del Caribe lo que hace que sea un país con una gran probabilidad de que ocurran sismos [1]. El municipio de Floridablanca cuenta con un nivel de amenaza sísmica alta de acuerdo con la norma sismo resistente colombiana [2]. Lo anterior denota la importancia de realizar una caracterización dinámica de los suelos aluviales presentes, con el motivo de conocer su comportamiento y respuesta ante eventos sísmicos, tráfico

vehicular, microsismos producto de equipos vibratorios, entre otros. Adicionalmente, Las propiedades dinámicas determinan el comportamiento elástico de los suelos, y su cálculo es de interés en el estudio de la interacción-suelo estructura [3].

Para la elaboración de este artículo se tomará como caso de estudio un nuevo proyecto en Floridablanca el cual consta de dos torres de apartamentos de 19 y 36 pisos, el cual se

Autor para correspondencia

Correo electrónico: director@ingteocnia.com.co (Carlos Andrés Buenahora-Ballesteros)

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña
Artículo bajo la licencia CC BY-NC (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es>)



desarrollará en un área de aproximadamente 4910m². Como insumos importantes para la caracterización del suelo, se realizarán ensayos geofísicos y de laboratorio como los son: ensayo de refracción sísmica, ensayo MASW, down-hole, triaxial cíclico, columna resonante, y ensayo de Bender element.

A través de la integración de los insumos anteriormente mencionados es posible construir las curvas de degradación y amortiguamiento, las cuales se utilizan para evidenciar el comportamiento dinámico de suelo en superficie debido a la propagación de la onda sísmica en suelos aluviales densos de la ciudad de Floridablanca. Lo anterior, mediante un análisis de amplificación de onda, zonificación y obtención de movimientos sísmicos de diseño en superficie a partir de varios métodos de análisis [2].

El resultado del análisis realizado permitió evidenciar que el comportamiento del perfil de la zona de interés es más rígido de lo esperado, es decir, no se comporta como un perfil de suelo tipo C [2], sino que su comportamiento se ajusta más a un espectro respuesta tipo B como mínimo para reflejar mejor la amenaza sísmica real. El análisis del comportamiento dinámico en superficie permite la optimización de los diseños sísmicos.

2. Área de estudio

La investigación tuvo como área de interés un proyecto localizado en el municipio de Floridablanca, en el departamento de Santander-Colombia. En el lote contiguo a la Clínica FOSCAL Internacional ubicada en la calle 158 barrio Cañaveral, como evidencia en la Figura 1.



Figura 1. Localización de la zona de estudio

3. Geología

3.1 Geología regional.

Teniendo en cuenta la información disponible por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), en sus planchas geológicas (ver figura 2), la zona de estudio comprende suelos aluviales compuestos por arenas finas y gruesas con presencia de gravas y fragmentos de roca predominantemente de arenisca. El sector litológicamente presenta suelos aluviales del miembro Órganos de formación Bucaramanga (Qbo) y suelos residuales de la formación Girón (Jg); ésta última formación se encuentra afectada por las Falla de Bucaramanga, Ruitoque y Florida.

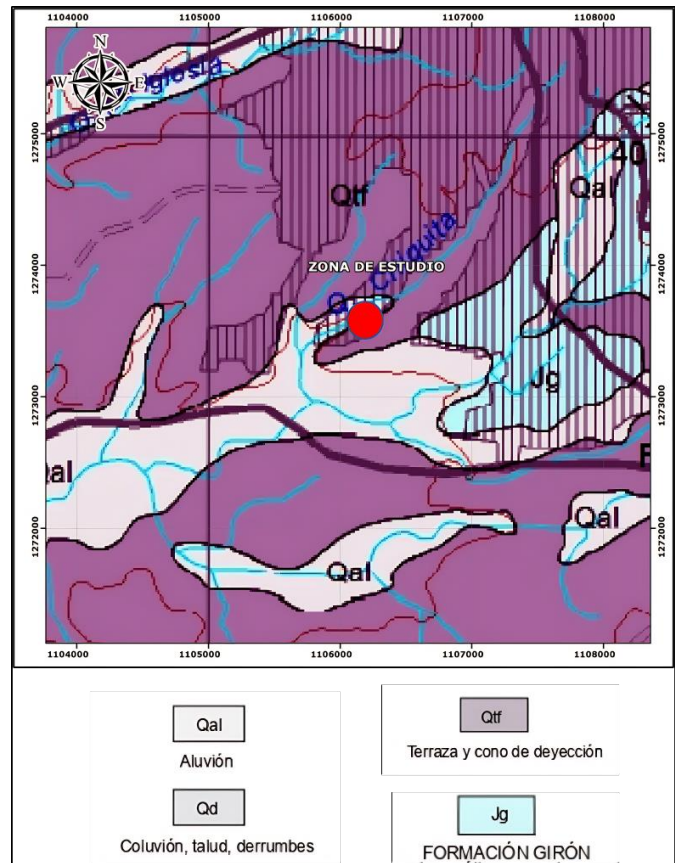


Figura 2. Mapa geológico regional, Tomado y modificado de (SGC, 2015a) [4]

3.2 Geología local.

En la zona se encontraron y se reconocieron principalmente, suelos de relleno y suelos removidos. Le infrayacen suelos aluviales caracterizados principalmente por presentar en gran parte de la secuencia abundantes cantos redondeados dentro de una matriz clasto-soportada y areno-soportada, y algunos lentes de material más fino con coloraciones variadas de extensión y espesor variables correspondientes al Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga (Qbo) (ver figura 3).

Adicionalmente, a mayor profundidad se evidenció la

presencia de suelos residuales de la formación Girón (Jg) compuestos por arenas arcillosas con gravas, guijarros y niveles delgados e intercalaciones de areniscas, areniscas cuarzosas y areniscas conglomeráticas con diferentes grados de meteorización.



Figura 3. Estratigrafía del área de estudio.

4. Metodología

Para lograr la estimación de los valores característicos de los parámetros dinámicos de los materiales que componen el área de estudio, fue necesario realizar las siguientes actividades:

4.1 Caracterización geotécnica.

Para la caracterización geotécnica de los suelos presentes, se realizaron sondeos geotécnicos a percusión y rotación, apiques, líneas sísmicas, down hole y tomografías eléctricas, distribuidos en toda el área de estudio, como se muestra en la figura 5.

4.1.1 Exploración directa. Se realizaron 5 sondeos geotécnicos a rotación, con profundidades variables entre 3.0 a 41.0 metros y 5 sondeos geotécnicos a percusión, con profundidades variables entre 1.5 y 4.0 con ensayos de penetración estándar cada 0.5 metros, para la recuperación de muestras y determinación de las características geomecánicas de los materiales existentes en el área de estudio. Adicionalmente se ejecutaron 3.0 apiques a 3.0 metros de profundidad, para la extracción de muestra inalterada para realizar ensayos de laboratorio especializados (ver Figura 4 y Figura 5). En la tabla 1 se muestra un breve resumen de la descripción de los materiales encontrados en las perforaciones de mayor profundidad.



Figura 4. Exploración geotécnica.



Figura 5. Extracción de muestras

Tabla 1. Resumen de perforación a mayor profundidad

Sondeo	Profundidad		Descripción
	Desde (m)	Hasta (m)	
	0.0	5.0	Miembro órganos Formación Bucaramanga (Obo): Arenas finas con algunas gravas finas y gruesas de rocas cuarzosas e ígneas, color marrón claro, marrón amarillento, algo húmedo, permeable.
SRT1	5.0	28.0	Miembro órganos Formación Bucaramanga (Qbo): Arenas arcillosas y arcillo-gravosas Cantos y bloques de areniscas y meta-areniscas resistentes dentro de una matriz areno-

arcillosa con gravas heterométricas. De color gris, beige, marrón, violeta, algo permeables
 Suelos residuales de la formación Girón (Jg): Arenas gravosas y arcillosas con niveles e intercalaciones de areniscas cuarzosas. De color beige, naranja, rojo, algo permeables y húmedas

28.0 41.0

4.1.2 Exploración indirecta.

Refracción Sísmica y MASW. El ensayo de MASW es un método que consiste en la interpretación de las ondas superficiales, donde al igual que en el ensayo de refracción, las ondas son generadas por una fuente impulsiva sobre un eje en la superficie del terreno. Este ensayo permite obtener una curva de dispersión que asocia la velocidad con la frecuencia y la longitud de onda, lo que evidencia la variación de la rigidez en profundidad [6]. Es decir, el método MASW permite identificar estratos blandos y rígidos.

La refracción sísmica se basa en la medición de los tiempos de viaje de ondas sísmicas generadas por una fuente impulsiva en la superficie del subsuelo (o cercana a ella) y que son refractadas en las interfaces entre medios (refractores) con propiedades físicas diferentes. El análisis de dichos tiempos de viaje, permite en principio obtener un perfil en profundidad de la distribución geométrica de los diferentes refractores, con las correspondientes velocidades a las cuales la onda sísmica se propaga a través de ellos [5].

En el presente proyecto los ensayos se realizaron a través del arreglo de 24 geófonos de 14 Hz para refracción sísmica y 4.5 Hz para ondas superficiales, con tendidos de 70 y 84 m utilizando un sismógrafo GEODE -24 CH. La figura 6 muestra los resultados de una de las líneas sísmicas ejecutadas, mostrando las distintas zonas estratigráficas y sus respectivas descripciones.

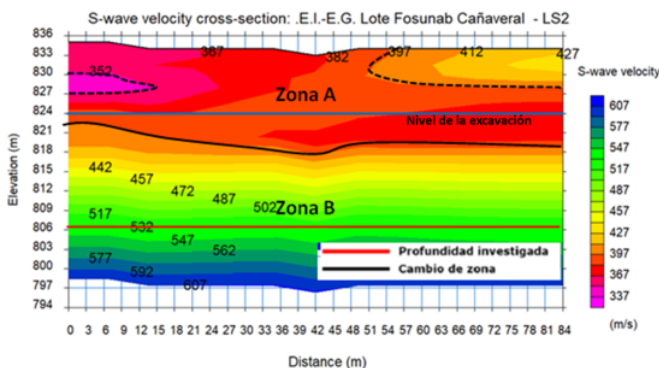


Figura 6. Ensayo de Ondas Superficiales MASW/2D LS2

La zona A presenta velocidades de corte (V_s) entre 360 y 390 m/s (Perfil tipo C) y velocidad de onda compresional (V_p) entre 441 y 735 m/s. Esta capa tiene un espesor de

6.0 a 15.0 metros y se asocia a suelos aluviales de consistencia densa a muy densa compuestos por arenas con gravas y arenas finas a muy finas.

Las líneas punteadas representan en el inicio de la línea sísmica la presencia de un material con velocidades un poco más bajas pero muy cercanas al promedio de velocidad de la capa, por lo que la consistencia del material en esta zona es un poco más suelta. Así mismo, superficialmente hay una zona con velocidades más altas asociadas a la presencia de gravas o bloques.

La zona B presenta velocidades de corte (V_s) superior a los 400 m/s y velocidad de onda compresional (V_p) superior a los 900 m/s. Esta capa se asocia a suelos aluviales de mayor rigidez y consistencia muy densa y hacia la parte norte del lote la exploración directa evidenció que después de 21.0 m se encuentra el estrato de suelo residual rígido de la formación Girón (Jg).

Down Hole. Este método consiste en la propagación de onda sísmica utilizado para mediciones de perfiles de onda de corte in situ para el análisis de la respuesta sísmica de un terreno [7]. Para la realización del ensayo, se generaron ondas en superficie mediante excitaciones sísmicas dando golpes verticales en una placa de nylon a una distancia de 0.90 m del pozo, donde se ubicó un geófono encargado de registrar los tiempos de viaje de las ondas compresionales y de corte, a partir de un sismógrafo Geometrics GEODE de 2 canales. La figura 7 evidencia los resultados obtenidos del ensayo, donde se puede apreciar el incremento de la rigidez en profundidad a medida de la velocidad de la onda de corte aumenta.

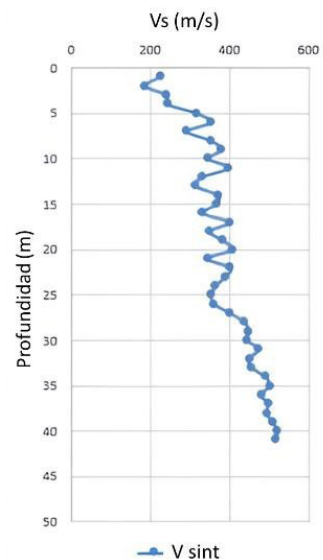


Figura 7. V_s interválica: ensayo de Down Hole

Tomografía eléctrica. El ensayo de tomografía eléctrica, se constituye uno de los métodos de prospección más tradicionales de la geofísica [8]. Su principio fundamental se basa en la medición de corrientes y voltajes generados por una inyección de corriente, inicialmente en la superficie y posteriormente en el interior del terreno. Con las dimensiones adquiridas se construye una sección en dos dimensiones (2D) que muestra una primera aproximación de los cambios en el subsuelo. Posteriormente, se aplica un algoritmo de inversión para obtener la distribución real de las resistividades o imagen eléctrica que dará información sobre las características físicas del subsuelo (ver figura 9), contribuyen a delimitar la geometría del área y con lugares con mayor conductividad eléctrica (menor resistividad).[9]

4.1.3 Ensayos de laboratorio.

Ensayo Triaxial cíclico. El ensayo triaxial está diseñado para investigar la respuesta del suelo en términos de deformación y los cambios en las propiedades mecánicas, particularmente el módulo de corte (G_{lab}) y la relación de amortiguamiento (D), en lugar de enfocarse solamente en la resistencia al corte [10]. Para la ejecución del ensayo se utilizó un equipo electromecánico que, al contar con un pistón eléctrico, los ciclos de carga son mucho más precisos. En la tabla 2 y la figura 8 se muestran los resultados obtenidos de uno de los ensayos triaxiales cíclicos realizados, el cual se sometió una presión de confinamiento de 400 KPa, se evidencian los resultados de la relación de amortiguamiento (D) y el módulo de corte (G_{lab}) para los diferentes ciclos de carga, así como las deformaciones.

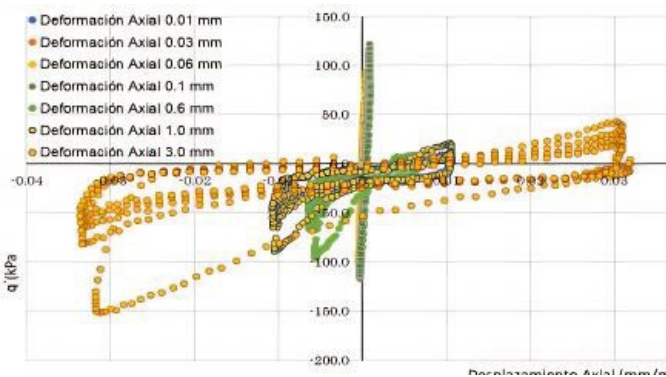


Figura 8. Ensayo triaxial cíclico (400 kPa)

Tabla 2. Resultados de triaxial cíclico (400 kPa)

Triaxial cíclico (400 kPa)		
Y	G _{lab}	D
%	Mpa	%
0.007	108.32	1
0.02	81.82	5
0.041	58.3	9.1
0.068	46.51	12.5
0.203	23.37	17.8

Ensayo de Bender Element. Este método consiste en aplicar un voltaje a un elemento piezocerámico, que trasmite un movimiento de corte sobre un extremo de la muestra cilíndrica de suelo. Esta perturbación viaja a lo largo de la probeta hasta el otro extremo donde otro elemento similar recibe la perturbación mecánica y genera un voltaje [11].

En este ensayo se mide la diferencia de tiempos entre las señales emitidas y recibidas y estas señales permiten calcular la velocidad de onda de corte y el módulo de corte inicial G_0 . Para calcular lo anteriormente mencionado se utiliza las siguientes ecuaciones:

$$V_{S_{lab}} = \frac{L}{ts} \tag{1}$$

[12]

Donde $V_{S_{lab}}$ es la velocidad de la onda de corte, L es la distancia entre los elementos bender, y ts es el tiempo de tránsito de la onda de corte.

Adicionalmente, un aspecto importante a realizar es la corrección por confinamiento una ecuación utilizada empírica es la siguiente:

$$V_{S_{labc}} = V_{S_{lab}} * (1 + k * \sigma')^{1/4} \tag{2}$$

[12]

Donde $V_{S_{lab}}$ es la velocidad de onda corregida por confinamiento, σ' es el confinamiento efectivo, y k es coeficiente dependiendo del tipo de suelo el cual para materiales granulares se utiliza el valor de 0.05 [12]. La tabla 4 evidencia los resultados de los ensayos ejecutados, donde la velocidad de onda de corte y el módulo de corte es mayor cuando la presión de confinamiento es más alta. Cabe señalar que el ensayo del apique 3, se debe descartar por un resultado atípico, seguramente por perturbación de la muestra algo muy común en la toma de muestras con alto contenido de arena.

Ensayo de Columna resonante. El ensayo de columna resonante es el método de laboratorio más utilizado para medir propiedades dinámicas del suelo en pequeñas deformaciones. Para la ejecución del ensayo una muestra

de suelo es sometida a una carga armónica, donde se controla la amplitud y la frecuencia de la carga mientras un transductor de movimiento mide el nivel de vibración de la resultante permitiendo obtener la rigidez del suelo a nivel de deformaciones pequeñas [13], así como el módulo de amortiguamiento y la velocidad de onda de corte V_s . La tabla 3 muestra los resultados obtenidos para una de las columnas de resonancia sometida a una presión de confinamiento de 150 kPa, donde se evidencia la frecuencia de resonancia, deformaciones y módulo de corte:

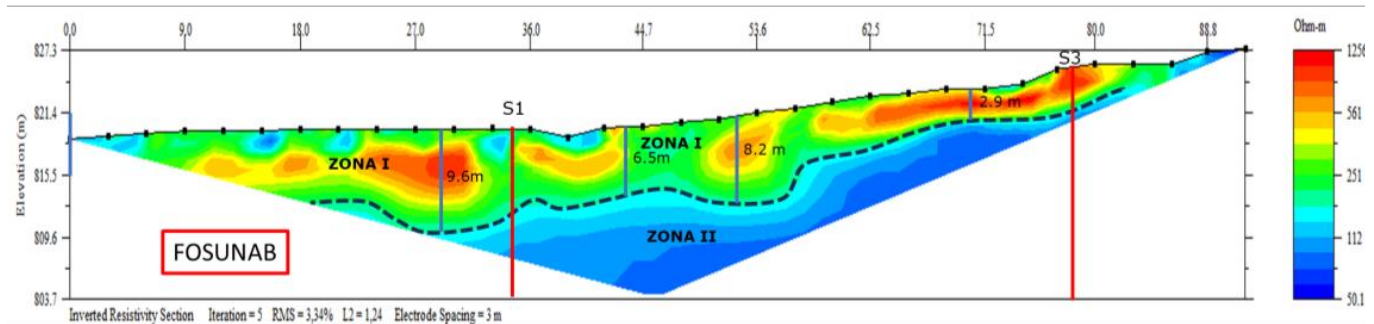
Tabla 3. Columna resonante 1 (150 kPa)

Fr	γ	Glab	D
Hz	%	Mpa	%
112	0.0013	86.7	0.5
110	0.0021	84.6	0.75
107	0.0036	81.0	1.1
104	0.0063	74.2	1.64

4.2 Recopilación y análisis de resultados.

Los suelos presentan un espectro de comportamiento bajo cargas dinámicas, cada uno con características y rasgos de deformación específicos. Los ensayos de Bender element y columna resonante determinan el módulo de corte máximo laboratorio y evaluar la degradación a pequeñas deformaciones. Por otro lado, los ensayos triaxiales contemplan el análisis proporcionando datos críticos sobre la degradación de módulos de corte a mayores deformaciones.

4.2.1 Integración y extrapolación de datos. Todos los ensayos deben coincidir en términos de deformación, estos ofrecen un punto de comparación coherente entre el G_{labmax} obtenido con Bender Element y columna resonante. A través de extrapolaciones cuidadosas del módulo de corte en magnitud, se construyen curvas de degradación para presiones de confinamiento de 400 kPa y 150 kPa. Además, se presentan valores intermedios para un confinamiento de 300 kPa, situados de manera representativa entre los datos extremos (ver figura 10).



La **ZONA I** compuesta por fragmentos de roca embebidos en matriz arcillosa y arena arcillosas con gravas heterométricas, bajo contenido de humedad. En algunos sectores con valores de resistividad (180-280 Ohm-m) predominan materiales de menor granulometría, arenas finas y medias. Esta zona pertenece al miembro órganos de la formación Bucaramanga.

La **ZONA II** presenta un descenso en los valores de resistividad, producto posiblemente de la presencia de alto contenido de humedad en el subsuelo. La zona esta compuesta por materiales granulares que comprenden intercalaciones entre suelos arenosos arcillosos, arcillosos y fragmentos de roca de areniscas embebidos entre arenas arcillosas.

Figura 9. Tomografía eléctrica

Tabla 4. Bender element

Apique	Altura inicial del espécimen	Longitud del instrumento bender (1)	Longitud del instrumento bender (1)	Promedio de Tiempo de Viaje de Onda	Velocidad de onda de corte medida (V_s)	Esfuerzo confinamiento	Velocidad de onda de corte corregida (V_{sc})	Peso unitario	Módulo de corte máximo laboratorio (G_{lab})
	mm	mm	mm	s	m/s	kPa	m/s	kN/m ³	MPa
Apique 1	98.7	4.72	5.19	0.00075	118	400	254	19.0	124
Apique 2	99.2	4.72	5.19	0.00076	117	150	201	19.5	80
Apique 3	101.2	4.72	5.19	0.00184	50	150	85	22.5	16

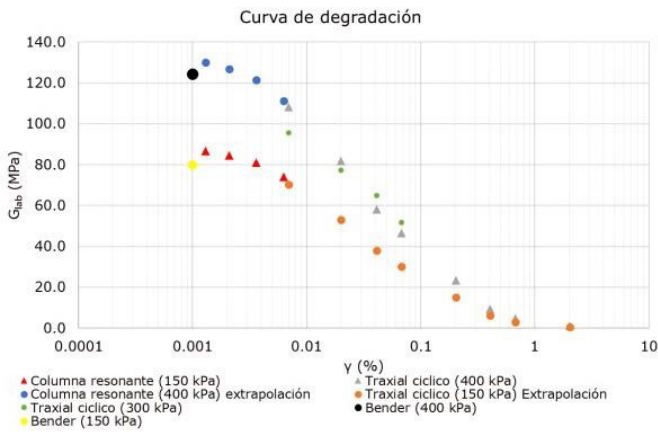


Figura 10. Recopilación de resultados: Curvas de degradación

De acuerdo con los resultados anteriores, se determinan las curvas normalizadas (ver figura 11), las cuales se pueden ajustar en esfuerzo dependiendo de la rigidez del material in situ la cual en general es medida a detalle a través de geofísica, en este caso, por MASW y Down Hole.

4.3 Insumos para determinar la respuesta local sísmica. Para esto es necesario definir el registro de aceleraciones representativas del entorno sísmico del sitio. Para el municipio de Floridablanca, según la ley 400 de 1997; para una probabilidad de excedencia del 10% en un lapso de 50 años, es decir, un periodo de retorno de 475 años y sin tener en cuenta respuestas locales, los valores de aceleración A_a y A_v tienen una magnitud de 0.25

La Figura 12 presentada, se realiza una comparación detallada entre el espectro de amenaza uniforme el EAU de Gallego ha sido ampliamente referenciado en el campo de la ingeniería sísmica [14]. Sin embargo, tras un análisis riguroso y la revisión de diversas publicaciones, se ha identificado que la ecuación de atenuación tiende a sobreestimar la amenaza sísmica en periodos de tiempo más largos, lo

cual se atribuye al uso de registros sísmicos afectados por efectos de sitio. Esta sobreestimación es unaconducir a un diseño conservador excesivo y a una asignación ineficiente de recursos en la mitigación del riesgo sísmico. Dado este contexto y basados en la evidencia técnica disponible, se ha tomado la decisión de adoptar el EAU proporcionado por el SGC. Esta elección se fundamenta en la búsqueda de una representación más precisa y ajustada de la amenaza sísmica para la región. Por esta razón, se ha utilizado la resolución D-080 del 25 de febrero del 2020, la cual se alinea con los últimos hallazgos y recomendaciones en la evaluación del riesgo sísmico.

Con base en esta desagregación y el espectro de amenaza uniforme para 475 años presentado por el SGC (2018) [15], se realizó una búsqueda en la base de datos del PEER de sismos reales representativos de diferentes fuentes sísmográficas (ver tabla 5). Seleccionaron dos (2) eventos sísmicos por cada fuente sísmogénica en cada una de sus componentes.

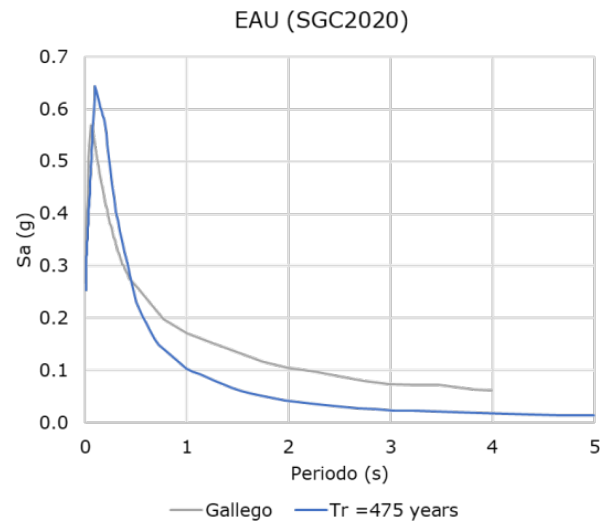


Figura 12. Espectro de Gallego vs espectro del SGC

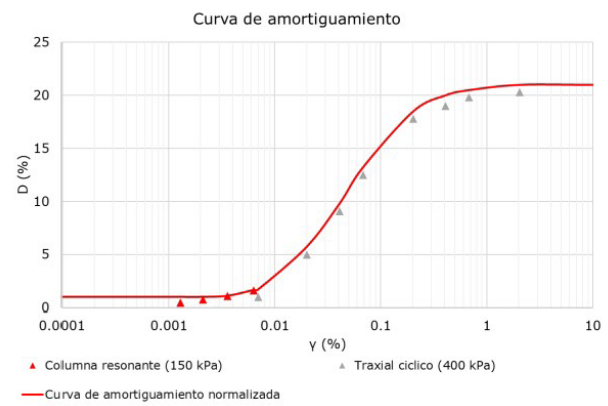
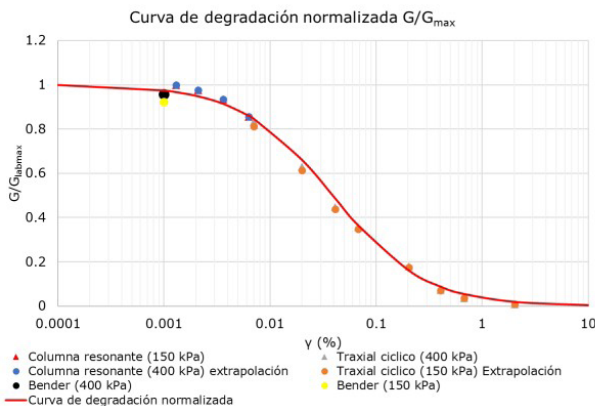


Figura 11. Curvas de degradación normalizada y curvas de amortiguamiento

Otro insumo necesario para obtener un espectro de respuesta local es el perfil geológico geotécnico, con base a los resultados de la exploración, para las modelaciones realizadas se contempló espesor de 40.0 m de depósito aluvial, debido a que posterior a ellos se tienen materiales con un v_s de más de 760 m/s en el cual propiamente, no generaría amplificación de onda.

Tabla 5. Sismos seleccionados (PEER)

Factor escalar	1	1.5	1.4	1.5	2.2	2.1
	F.					
	F. cercana		intermedia		F. lejana	
	RSN	RSN	RSN	RSN	RSN	RSN
EAU						
SGC475	72	8110	81	1626	3079	5911
	72	8110	81	1626	3079	5911

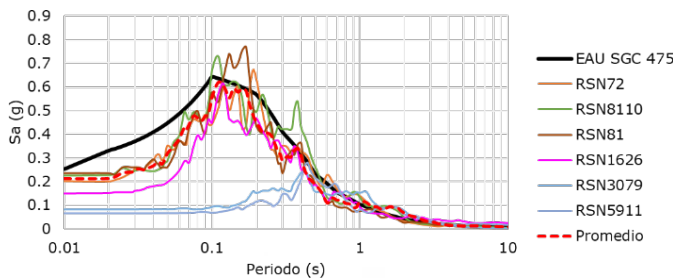


Figura 13. Espectro promedio de los sismos seleccionados vs el espectro de amenaza uniforme de la ciudad de Bucaramanga

4.4 Análisis de respuesta dinámica mediante propagación vertical o bidimensional.

A continuación, la figura 14 evidencia los análisis no lineales en el software de elementos finitos Plaxis donde se expone que el perfil tomado corresponde a suelo aluvial denso, el cual aumenta en profundidad su rigidez y resistencia.

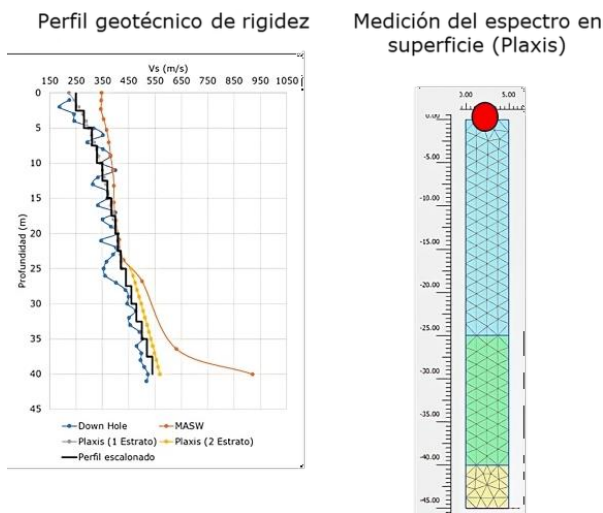


Figura 14. Perfil geotécnico de rigidez a bajas deformaciones y modelación de respuesta en superficie de plaxis

4.5 Respuesta Local.

4.5.1 Modelación en Deepsoil. Se realizó el análisis de respuesta unidimensional con el programa Deepsoil V7.0. Este programa realiza un análisis de propagación unidimensional de ondas de corte horizontal teniendo en cuenta las variaciones de la relación de amortiguamiento y el módulo de corte con la deformación en los suelos del perfil. Este modelo implemento una geometría de una línea equivalente de diferencias finitas.

En este caso se fijó la curva de degradación y amortiguamiento definida a través de los ensayos de laboratorio, así mismo se muestra una capa ejemplo con su aproximación mencionada anteriormente. De acuerdo a lo anterior, la figura 15 presenta las aceleraciones espectrales obtenidas en superficie para las dos componentes horizontales de los seis sismos seleccionados en el análisis.

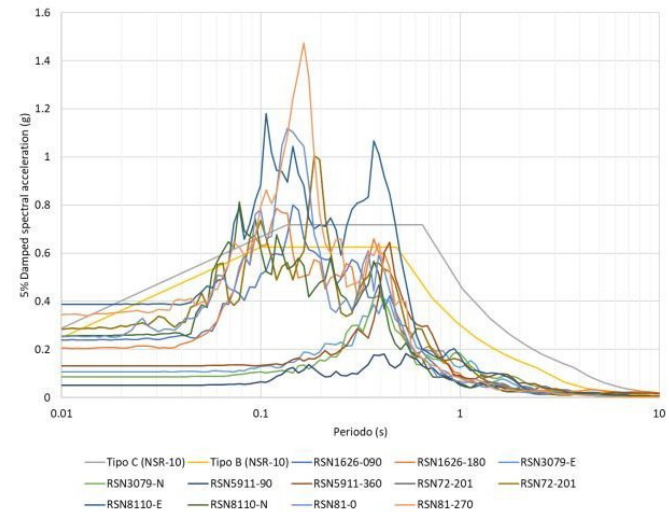


Figura 15. Aceleraciones espectrales obtenidas en superficie

4.5.2 Modelación en Plaxis. Con el objeto de verificar el comportamiento en superficie con un modelo no lineal, se realizó una modelación en plaxis con geometría de elementos finitos con análisis dinámico con amortiguación viscosa e histerética, con el modelo HS small el cual permite tener curvas de degradación y amortiguamiento asociadas al material, dependiendo de la rigidez en profundidad y resistencia del material con criterio de Mohr Coulomb (ver figura 14 y tabla 6).

4.5.3 Comparación del espectro de respuesta de Deepsoil y Plaxis. De acuerdo con los análisis detallados se identifica que el resultado lineal equivalente de Deepsoil es casi el mismo en respuesta que plaxis, al considerar espesores similares de suelos y al considerar parámetros similares de rigidez en los modelos. Lo cual indica que el análisis de respuesta local de las señales escogidas es consistente y tiene un buen

punto de partida para próximos estudios más detallados. (ver figura 16).

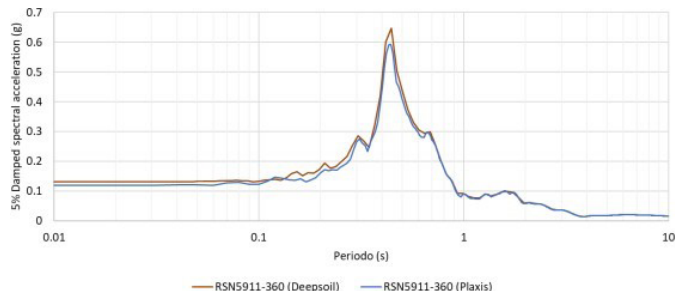


Figura 16. Espectro de respuesta en superficie Deepsoil- plaxis señal RSN5911-360

5. Conclusiones y discusión

A través de la integración de ensayos geotécnicos de campo y de laboratorio, se logró definir con alta precisión un perfil geo- mecánico del sitio que incluye, rigidez, resistencia, amortiguamiento y rigidez dependiente de la deformación.

Gracias a la aplicación de métodos de extracción de muestras de suelo sin remoldear, altamente sofisticados y controlados dada su alta dureza y composición granular, donde se ha podido preservar la integridad del comportamiento del material, incluso en muestras de gran espesor. Este cuidado en la manipulación ha sido crucial para asegurar la validez de las mediciones y observaciones, ya que en la mayoría de los casos resulta ser inviable su ejecución o sus resultados no reflejan la realidad de su comportamiento.

La investigación ha revelado que, en el caso de estudio expuesto, el perfil de suelos de la zona, al exhibir un comportamiento más rígido de lo esperado, no se ajusta

propriadamente al espectro de respuesta tipo C definido en la normativa.

NSR-10. Esta rigidez inherente resulta en una sobrestimación de la amplificación de movimientos sísmicos en períodos largos. Por lo tanto, se recomienda considerar un espectro de respuesta tipo B como mínimo para reflejar mejor la amenaza sísmica real. Esta reevaluación normativa lleva a prever una menor aceleración espectral para estructuras de mayor altura, lo cual tiene implicaciones significativas en el diseño sísmico y por ende en los costos.

El presente estudio también aporta indicios preliminares sobre la diferenciación de la amenaza sísmica en la zona de Floridablanca, sentando las bases para futuras investigaciones más detalladas en sismología y geotecnia avanzada. Además, se proveen datos valiosos y verificados para la comunidad de especialistas en ingeniería sísmica y estructural, fundamentales para el desarrollo de análisis posteriores. Cabe destacar que la validez de estos insumos se ha corroborado mediante mediciones empíricas, tanto en el laboratorio como en el terreno, utilizando técnicas de caracterización de vanguardia. Estos hallazgos constituyen un paso significativo hacia la mejora de los estándares de seguridad sísmica y la optimización del diseño estructural en zonas sísmicamente activas, asegurando que los futuros desarrollos arquitectónicos y de infraestructura en Floridablanca estén respaldados por una comprensión profunda y precisa de las propiedades dinámicas del suelo.

Tabla 6. Parámetros de modelación en Plaxis

T	Y(Kn/ m3)	E50ref (kPa)	Eoderef (kPa)	Eurref (kPa)	Goref (kPa)	y0.7	φ(°)	c' (kPa)	m	m _{pref} (kPa)	ξ1 (%)	ξ2 (%)	f1 (Hz)	f2 (Hz)
						1.50			0					
1	19	12000	12000	36000	250000	E	35	15	.	100	1	1	1	10
2	19	10560	10560	31680	220000	4			5					

6. Referencias

[1] D. M. Criado, W. A. Pacheco y N. Afanador, “Vulnerabilidad sísmica de centros poblados: estudio de caso”, *Revista Ingenio*, vol. 17, n°1, pp.43-4 8, 2020, doi: <https://doi.org/10.22463/2011642x.2441>.

[2] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 Tomo 2*, 2010.

[3] C. A. Martínez-Ovallos, R. J. Gallardo- Amaya y N. Afanador-García, “Determinación de los parámetros dinámicos en depósitos sedimentarios de Ocaña Norte de Santander, mediante métodos geofísicos”, *Revista ingenio*, vol .15, n°1, pp.51-57, 2018. <https://doi.org/10.22463/2011642x.3139>.

[4] Mapa geológico regional, Servicio geológico Colombiano SGC, 2015.

[5] M. A. Rivera, R. Piedra and Y. Paripanca. “Ensayos Geofísicos de Refracción Sísmica y de Medición de Ondas de Corte (MASW y MAM) para usos de cimentación en obras de edificaciones”, *Revista Civilizante*, n 8, 2016

[6] B. B. Redpath, “Seismic Refraction Exploration for Engineering Site Investigations”. Technical Report E-73-4, 1973 US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksbury.

[7] N. Correia Machuca, “Obtención del perfil de velocidad de onda de corte mediante método MASW y comparación con ensayo tipo downhole

- en estaciones sismológicas de zona central,” Tesis de pregrado, Universidad de Chile, Chile, 2015.
- [8] D. Arias, “Exploración geotécnica- Relaciones geoelectricas,” Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Col, 2011.
- [9] R. Vida, et al , “Integration of GIS, Electromagnetic and Electrical Methods in the Delimitation of Groundwater Polluted by Effluent Discharge (Salamanca, Spain): A Case Study”. *Environ. Res. Public Health* 2017, 14, 1369; 2017.
- [10] ASTM, American Society for Testing and Materials, Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Fixed- Base Resonant Column Devices D5311, 2011.