

**CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL DEPÓSITO FLUVIO-LACUSTRE DE
TUNJA, EMPLEANDO ENSAYOS BENDER ELEMENT**

SANDRA MARCELA BLANCO PERILLA

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
ESCUELA DE POSTGRADOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN GEOTECNIA
TUNJA
2018**

**CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL DEPÓSITO FLUVIO-LACUSTRE DE
TUNJA, EMPLEANDO ENSAYOS BENDER ELEMENT**

SANDRA MARCELA BLANCO PERILLA

Trabajo de grado presentado para obtener el título de Magister en Geotecnia

Director:

Ing. Mcs. Omar Javier Jiménez Jiménez

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
ESCUELA DE POSTGRADOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN GEOTECNIA
TUNJA
2018**

Nota de Aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma de jurado

Firma de jurado

Tunja, 15 de Mayo de 2018

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado en primer lugar a Dios, quien día a día me demuestra la grandeza de su amor con todas las bendiciones que me brinda y por permitirme terminar satisfactoriamente con este gran logro.

A mis padres por su apoyo incondicional en todos los proyectos de mi vida, por ser mi mayor ejemplo a seguir y por la educación en valores que siempre me dieron.

A mi hija, Sara, mi mayor motivación y más grande bendición. Por enseñarme el significado de un amor sincero, por siempre tener una bonita palabra de aliento y por ser mi bastón en los momentos difíciles.

A mis hermanos, Lizeth y Juan Miguel, por siempre acompañarme en todos los proyectos de mi vida.

A mis abuelitas, tíos y primos por su apoyo y colaboración.

A mis pocos pero grandes amigos que siempre estuvieron pendientes para brindarme su apoyo en la culminación de esta gran meta en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a Dios por permitirme culminar este gran logro que implicó sacrificios, esfuerzos, trabajo y dedicación. Por siempre guiarme y darme la fuerza necesaria para continuar trabajando y no desfallecer ante las adversidades presentadas.

También quiero Agradecer a las siguientes personas que con su apoyo contribuyeron al desarrollo de esta investigación:

Al Ing. Omar Jiménez, por ser mi director, por su dedicación y aporte desde el punto de vista técnico. Por su colaboración en la ejecución de los ensayos de laboratorio y en la obtención de muestras de suelo por medio de su empresa Civilterra S.A.S

A los Ingenieros Osmar Gamba y Cristian Pinilla, por su colaboración en el desarrollo de las prácticas de Laboratorio

Al Ing. Libardo López y su empresa López Hermanos LTDA, por su colaboración con algunas muestras de suelo para la ejecución de los ensayos.

A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, por el préstamo de los equipos de perforación y las instalaciones de los laboratorios para el desarrollo de las prácticas de laboratorio realizadas en ésta investigación.

RESUMEN

La respuesta de un suelo ante un evento sísmico está determinada por sus propiedades dinámicas, su disposición estratigráfica y la topografía de la zona. Actualmente existen diferentes ensayos de campo y de laboratorio que permiten conocer estas propiedades dinámicas, con algunas ventajas y desventajas en cuanto a su tiempo de ejecución, precisión en los resultados y costo. En el presente libro se dan a conocer los resultados de las propiedades dinámicas de los suelos encontrados en el depósito fluviolacustre de la ciudad de Tunja, determinadas mediante el ensayo Bender Element y algunos ensayos triaxiales, con el fin de contribuir al proceso de caracterización dinámica de la ciudad y, por consiguiente, a su microzonificación sísmica.

Para el desarrollo de esta investigación se tenía planteada la recolección de muestras de suelo en condición inalterada (mínimo 30), en las empresas de estudios geotécnicos de la ciudad en las cuales inicialmente no se logró obtener ninguna ya que no contaban con estudios recientes en la zona de estudio, por tal razón se procedió a la realización siete sondeos en sitios ubicados dentro del depósito fluviolacustre de la ciudad de Tunja, con el fin de obtener las muestras necesarias para la investigación. Las perforaciones se realizaron con el equipo de perforación manual de la UPTC, con profundidades de hasta 9 m. Terminando los ensayos planteados para la investigación la empresa López Hermanos Ltda. realizó un estudio geotécnico dentro de la zona de estudio, localizado frente al Coliseo, de donde se recibieron dos muestras. De igual manera, de la empresa Civilterra S.A.S se recibieron dos muestras de un estudio de suelos realizado en el barrio las Quintas.

Paralelamente al proceso de recolección de muestras, se consultó toda la información disponible de los estudios de caracterización dinámica y geotécnica existentes de la Ciudad de Tunja con el objetivo de complementar la investigación y poder tanto validar como comparar los resultados obtenidos.

Con las muestras de suelo obtenidas, se realizaron 32 ensayos de Bender Element para determinar las velocidades de propagación de onda cortante (V_s) y de onda compresiva (V_p). Estos ensayos se realizaron en la humedad natural a la cual se encontraba el suelo, posteriormente en condición saturada y para tres niveles de consolidación diferentes, esto para generar variación en las relaciones de vacíos y poder observar de qué manera estas condiciones afectaban las velocidades de onda.

Después de ejecutar los ensayos Bender Element se determinaron las propiedades índice de cada una de las muestras por medio de ensayos de humedad, límites de Atterberg, gravedad específica, contenido de materia orgánica y análisis granulométrico. Para tres de las muestras obtenidas se realizaron ensayos triaxiales cíclicos, con el fin de comparar sus resultados con los obtenidos por medio del ensayo Bender Element.

Con los resultados obtenidos se realizaron los siguientes análisis:

- Comparación de la variación de las velocidades de onda para diferentes condiciones del ensayo.
- Realización de gráficas con el fin de observar la variación de la velocidad de onda cortante (V_s) en función de propiedades como: Índice de Plasticidad, Límite líquido y humedad.
- Determinación de las propiedades dinámicas del suelo: Velocidad de onda cortante (V_s), Velocidad de onda compresiva (V_p), Módulo de cortante máximo (G_{max}) y relación de Poisson (ν).
- Identificación de las ventajas y desventajas del ensayo Bender Element
- Definición de zonas de comportamiento homogéneo del depósito fluviolacustre de la ciudad de Tunja, de acuerdo con los valores de velocidad de onda cortante (V_s) y velocidad de onda compresiva (V_p) obtenidos mediante el ensayo Bender Element; para lo cual se empleó el software ArcGIS versión 10.4.

Finalmente se analizaron los resultados obtenidos, comparándolos y complementándolos con proyectos e investigaciones ya realizadas.

ABSTRACT

The response of a soil to a seismic event is determined by its dynamic properties, its stratigraphic layout and the topography of the area. Currently there are different field and laboratory tests, which allow to know these dynamic properties, with some advantages and disadvantages in terms of their execution time, accuracy in results and cost. In this book we present the results of the dynamic properties of soils found in the fluvio-lacustrine deposit of the city of Tunja, determined through the Bender Element test and some triaxial tests, in order to contribute to the process of dynamic characterization of the city and therefore to its seismic microzoning.

For the development of this research the soils samples had been collected in unaltered condition (minimum 30) in the companies of geotechnical studies of the city, initially couldn't get any, because they had no recent studies in the study area, for this reason seven probings were conducted at sites located in the fluvio-lacustrine deposit of the city of Tunja in order to obtain the necessary samples for the investigation. Drilling was carried out with the UPTC manual drilling equipment, with depths until 9 meters. Completing the tests proposed for the investigation, the company López Hermanos Ltda. made a geotechnical study in the study area, located in front of the Coliseum, from where two samples were received. In the same way, the company Civilterra S.A.S received two samples of a study carried out in the neighborhood of Las Quintas.

Parallel to the process of sample collection, all available information from the existing dynamic and geotechnical characterization studies of the City of Tunja was consulted with the aim of complementing the research and being able to both validate and compare the results obtained.

With the obtained soil samples, 32 Bender Element tests were carried out to determine the shear wave propagation velocities (V_s) and compressive wave velocity (V_p). These tests were performed on the natural moisture at which the soil was, then in saturated condition and for three different levels of consolidation, this to generate variation in the empty relation and to observe how these conditions affected the wave velocities.

After running the Bender Element tests, the index properties of each of the samples were determined by means of moisture tests, Atterberg limits, specific gravity, organic matter content and granulometric analysis. For three of the samples obtained three cyclic triaxial tests were carried out.

With the results obtained the following analysis were made:

- Comparison of the variation of wave velocities for different test conditions.
- Graphs were constructed in order to observe the variation of the shear wave velocity (V_s) as a function of properties such as: plasticity index, liquid limit and humidity.
- The dynamic properties of the soil were determined.

- The advantages and disadvantages of the Bender Element trial were identified areas of homogeneous behavior of the fluvio-lacustrial deposit of the city of Tunja were generated, according to the values of shear wave velocity (V_s) and compressive wave velocity (V_p) obtained by the Bender Element test; for which ArcGIS software version 10.4 was used.

Finally, the results obtained were analyzed, comparing them and complementing them with projects and research already carried out.

TABLA DE CONTENIDO

1. GENERALIDADES	19
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	19
1.2 JUSTIFICACIÓN	20
1.3 OBJETIVOS.....	21
1.3.1 Objetivo general	21
1.3.2 Objetivos específicos.....	21
1.4 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO	22
2. MARCO REFERENCIAL	24
2.1 MARCO CONCEPTUAL.....	24
2.1.1 Comportamiento dinámico del suelo:.....	24
2.1.2 Determinación de los parámetros dinámicos del suelo:	27
2.2 ESTADO DEL ARTE	32
2.2.1 Ensayo Bender Element	32
2.2.2 Caracterización Dinámica de la ciudad de Tunja	43
2.2.3 Variación de las propiedades dinámicas del suelo en función de sus propiedades físicas.....	48
3. METODOLOGÍA.....	50
3.1 DEFINICIÓN DE HIPÓTESIS Y VARIABLES	50
3.2 METODOLOGÍA DESARROLLADA	50
3.2.1 Fase inicial	52
3.2.1.1 Recolección de muestras de suelo e información primaria	52
3.2.1.2 Realización de Sondeos.....	52
3.2.2 Fase experimental	57
3.2.2.1 Ejecución de ensayos Dinámicos	57
3.2.2.2 Determinación Propiedades Índice.	61
3.2.3 Fase final (procesamiento de la información y análisis)	63
3.2.3.1 Relación parámetros dinámicos y propiedades índice:.....	63
3.2.3.2 Procesamiento de la información:	63
3.2.3.3 Resultados y conclusiones	63
4. RESULTADOS	65
4.1 ENSAYOS BENDER ELEMENT	65

4.2	ENSAYOS DE PROPIEDADES BÁSICAS	69
4.2.1	Humedad Natural	69
4.2.2	Límites de Atterberg	69
4.2.3	Gravedad Especifica (Gs).....	72
4.2.4	Granulometría – Hidrómetro y Lavados	72
4.2.5	Contenido de materia orgánica	72
4.3	ENSAYOS TRIAXIALES	73
4.4	PROPIEDADES DINÁMICAS	74
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	76
5.1	VARIACIÓN DE V_s Y V_p SEGÚN LA CONDICIÓN DEL ENSAYO	76
5.1.1	Variación V_s en función de la condición del ensayo	80
5.1.2	Variación V_p en función de la condición del ensayo	86
5.2	Análisis porcentual para V_s y V_p	89
5.3	VARIACIÓN DE V_s Y V_p SEGÚN TIPO DE SUELO.....	90
5.4	VARIACIÓN V_s EN UN MISMO ENSAYO.....	92
5.5	RELACIÓN V_s CON V_p	93
5.6	VALORES FINALES V_s	99
5.7	VARIACIÓN DE LAS VELOCIDADES DE ONDA EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD.....	101
5.8	VARIACIÓN DE V_s EN FUNCIÓN DE PROPIEDADES BÁSICAS.....	103
5.9	ANÁLISIS RESULTADOS ENSAYOS DINÁMICOS	106
5.10	MAPA ZONIFICACIÓN.....	107
6.	CONCLUSIONES.....	111
7.	RECOMENDACIONES.....	113
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización Municipio de Tunja.....	22
Figura 2. Localización zona de estudio, mapa geológico de la ciudad de Tunja...	22
Figura 3. Leyenda Mapa Geológico de la Ciudad de Tunja.....	23
Figura 4. Propagación onda P.....	25
Figura 5. Propagación onda S.....	26
Figura 6. Sismograma típico.....	26
Figura 7. Elemento Bender.....	29
Figura 8. Montaje Ensayo Bender Element.....	29
Figura 9. Curvas del módulo de reducción para suelos finos de diferente plasticidad.	31
Figura 10. Influencia de la presión efectiva de confinamiento en las curvas del módulo de reducción.....	31
Figura 11. Variación del coeficiente de amortiguamiento para suelos finos.....	31
Figura 12. Estimación del tiempo de retraso del equipo.....	34
Figura 13. Instalación de los elementos Bender y los acelerómetros en el espécimen de suelo.....	35
Figura 14. Ilustración esquemática del equipo de columna resonante con los Elementos Bender.....	36
Figura 15. Resultados en arena seca de Toyoura a) Onda P b) Onda S.....	37
Figura 16. Comparación de señales recibidas en tres arenas.....	37
Figura 17. Variación de Vs con el esfuerzo de confinamiento efectivo para a) arena natural de Hangzhou y b) arena natural de Nanjing bajo condición saturada.....	40
Figura 18. Consolidómetro con pared flotante – sistema de ensayo de Bender Element.....	42
Figura 19. Velocidades de onda típicas vs esfuerzo vertical aplicado en muestras de caolinita.....	43
Figura 20. Localización de las secciones recomendadas.....	44
Figura 21. Zona de Estudio.....	45
Figura 22. Zona de estudio de la tesis “Estudio de respuesta dinámica del subsuelo en la ciudad de Tunja – Sector Norte”.....	46
Figura 23. Zonificación de la respuesta dinámica de la ciudad de Tunja- sector norte	47
Figura 24. Zonas de Respuesta Dinámica identificadas en el área de estudio...	47
Figura 25. Curvas del módulo de reducción para suelos de grano fino de diferentes plasticidades.....	48
Figura 26. Influencia la presión de confinamiento media efectiva en las curvas del módulo de reducción para a) suelos no plásticos ($IP = 0$), y b) Suelos plásticos ($IP = 50$).	48
Figura 27. Variación del coeficiente de amortiguamiento para suelos de grano fino con amplitud de deformación cortante cíclica y plasticidad.....	49
Figura 28. Metodología desarrollada.....	51
Figura 29. Localización general sitios de muestreo.....	53
Figura 30. Localización detallada sondeos.....	54

Figura 31. Perfil estratigráfico Sondeo 1 y 2 – Sitio 1 (Hayuelos)	55
Figura 32. Perfil estratigráfico Sondeo 1, 2, 3, 4 y 5 – Sitio 2 (Bomberos).....	55
Figura 33. Leyenda perfiles estratigráficos	56
Figura 34. Perforación mecánica frente al Coliseo – Sitio 4	56
Figura 35. Parámetros de entrada ensayo Bender Element	57
Figura 36. Muestra dañada durante el ensayo Bender Element.....	58
Figura 37. Montaje ensayo Bender Element	60
Figura 38. Ensayo de límites de Atterberg	61
Figura 39. Ensayo de Gravedad Específica	62
Figura 40. Contenido de Materia orgánica	62
Figura 41. Ensayo Hidrómetro	62
Figura 42. Ensayo Hidrómetro	63
Figura 43. Clasificación USCS muestras ensayadas con Bender Element.....	69
Figura 44. Curva de Amortiguamiento.....	73
Figura 45. Curva de Reducción del Módulo	73
Figura 46. Variación de Vs y Vp en función de la condición del ensayo	76
Figura 47. Variación de Vs para todos los ensayos realizados en condiciones adicionales a la natural	80
Figura 48. Variación Vs Tendencia 1	81
Figura 49. Variación Vs Tendencia 2	82
Figura 50. Variación Vs Tendencia 3	83
Figura 51. Variación Vs Tendencia 4	84
Figura 52. Variación Vs tendencia 5.....	85
Figura 53. Variación Vs Tendencia 6	85
Figura 54. Variación de Vp para todos los ensayos	86
Figura 55. Variación Vp - Tendencia 1	87
Figura 56 Variación Vp - Tendencia 2	88
Figura 57. Tendencia Vs según condición del ensayo.....	89
Figura 58. Tendencia Vp según la condición del ensayo.....	90
Figura 59. Variación Vs y Vp para suelos MH	91
Figura 60. Variación Vs y Vp para suelos OH	91
Figura 61. Variación Vs y Vp para suelos CH	91
Figura 62. Variación Vs y Vp para suelos CL	91
Figura 63. Mediciones realizadas en el ensayo Bender Element #9.....	92
Figura 64. Comparación mediciones del ensayo Bender Element #9.....	93
Figura 65. Vp vs Vs para todos los ensayos	95
Figura 66. Relación Vp/Vs.....	96
Figura 67. Relación Vp/Vs.....	96
Figura 68. Relación Vp/Vs por material	97
Figura 69. Variación de Vs y Vp con la profundidad - Sitio 1	101
Figura 70. Variación de Vs y Vp con la profundidad - Sitio 1	102
Figura 71. Variación Vs en función de w	103
Figura 72. Variación Vs en función de LL.....	103
Figura 73. Variación Vs en función de LP	104
Figura 74. Variación Vs en función de IP	104

Figura 75. Variación V_s en función de IP. a) Tendencia 1 b) Tendencia 2	105
Figura 76. Zonificación V_s para el depósito fluvio-lacustre de la ciudad de Tunja	109
Figura 77. Zonificación V_p para el depósito fluvio-lacustre de la ciudad de Tunja	110

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Rango y características de los ensayos de laboratorios.	28
Tabla 2. Correlaciones de Vs y N de SPT	30
Tabla 3. Valores de L/λ para varios casos de estudio con frecuencia de entrada desde 10kHz en la señal de onda cortante medida.	33
Tabla 4. Propiedades físicas de los especímenes ensayados.....	34
Tabla 5. Resultados de los ensayos Bender Element	34
Tabla 6. Resumen comparativo de los resultados del Bender Element y los Acelerómetros.....	35
Tabla 7. Propiedades principales de las tres arenas ensayadas	36
Tabla 8. Velocidad de onda cortante determinada por tres métodos, para diferentes presiones de confinamiento.	39
Tabla 9. Resultados obtenidos de la velocidad de onda cortante (Vs) en m/s, con las tres técnicas planteadas	42
Tabla 10. Localización sitios	53
Tabla 11. Localización sondeos Sitio 1 – Hayuelos.....	53
Tabla 12. Localización sondeos Sitio 2 - Bomberos	54
Tabla 13. Localización muestras ensayadas con Bender Element.....	65
Tabla 14. Listado de ensayos Bender Element realizados en cada condición propuesta.....	66
Tabla 15. Resultados Velocidades de Onda Vs y Vp, en Diferentes Condiciones	68
Tabla 16. Propiedades básicas de las muestras empleadas en el ensayo Bender Element.....	70
Tabla 17. Resultados Gravedad Especifica para las muestras utilizadas en los ensayos Bender Element	71
Tabla 18. Resultados ensayo de Hidrómetro	72
Tabla 19. Resultados Ensayo Lavado sobre tamiz N° 200	72
Tabla 20. Resultados contenido de materia orgánica de las muestras ensayadas con Bender Element.....	73
Tabla 21. Propiedades Básicas de las muestras usadas en el ensayo Triaxial ...	74
Tabla 22. Propiedades Dinámicas.....	74
Tabla 23. Propiedades básicas de ensayos Bender Element - Tendencia 1	81
Tabla 24. Propiedades básicas de ensayos Bender Element - Tendencia 2	82
Tabla 25. Propiedades básicas de ensayos Bender Element - Tendencia 3	83
Tabla 26. Propiedades básicas de ensayos Bender Element - Tendencia 4	84
Tabla 27. Propiedades básicas de ensayos Bender Element - Tendencia 5	85
Tabla 28. Propiedades básicas de ensayos Bender Element – Tendencia 6	85
Tabla 29. Propiedades básicas de ensayos Bender Element – Tendencia 1 Vp ..	87
Tabla 30. Propiedades básicas de ensayos Bender Element – Tendencia 2 Vp ..	88
Tabla 31. Relación Vp/Vs.....	94
Tabla 32. Verificación si Vp es mayor que Vs	98
Tabla 33. Clasificación de los perfiles de suelo según NSR-10.....	99
Tabla 34. Valores definitivos Vs	100

Tabla 35. Valores de Vs obtenidos en la Tesis “Estudio de Respuesta Dinámica del subsuelo en la ciudad de Tunja - Sector Norte”	108
---	-----

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los sismos constituyen uno de los fenómenos naturales más reconocidos por generar grandes daños y pérdida de un gran número de vidas humanas. A esto se suma el hecho de que son fenómenos que no se pueden predecir, por esta razón resulta importante realizar estudios que permitan que las construcciones y las obras civiles sean cada vez más seguras y resistentes a éste tipo de procesos, así como identificar zonas que de acuerdo a su condición geológica puedan ser las que presenten una mayor susceptibilidad a daños, para lo cual es muy importante contar con estudios de respuesta dinámica.

La ciudad de Tunja se encuentra localizada en una zona de amenaza sísmica intermedia, adicionalmente cuenta con una población mayor a los 100.000 habitantes. Teniendo en cuenta la NSR 10 es necesario que ésta cuente con estudios de respuesta dinámica propios, y que no solo se tengan en cuenta en los diseños geotécnicos y estructurales los datos promedios suministrados por la reglamentación vigente.

En esta investigación se realiza una caracterización preliminar del depósito fluviolacustre de la ciudad de Tunja con el fin de contribuir al estudio de respuesta final que se debe realizar para la ciudad. Para esta se utilizaron 32 muestras de suelo tomadas de diferentes zonas del depósito y se realizaron ensayos Bender Element y ensayos triaxiales por medio de los cuales se obtuvieron propiedades dinámicas de los mismos. También se realizaron 3 ensayos triaxiales para poder comparar sus resultados con los obtenidos por medio del ensayo Bender Element.

Los ensayos Bender Element se realizaron en la condición natural en la cual se encontraba el suelo, en condición saturada y para tres valores diferentes de relación de vacíos para poder observar de qué manera al cambiar su condición natural se pueden ver afectadas las velocidades de onda del material.

Con los valores de Velocidad de onda cortante (V_s) y Velocidad de onda compresiva (V_p) obtenidos, y la información recopilada se generó una zonificación sísmica preliminar para el depósito.

El presente informe está conformado por ocho capítulos que muestran todo el desarrollo de la investigación para llegar al cumplimiento de los objetivos planteados.

En los capítulos 1, 2 y 3 se exponen las generalidades del proyecto y a su vez comprende marco teórico, estado de arte, metodología de la investigación con el fin de dar un conocimiento de las bases teóricas que permitieron y facilitaron el desarrollo de la investigación.

En el capítulo 4 se dan a conocer los resultados obtenidos y en el capítulo 5 el análisis de los mismos.

Finalmente en los capítulos 6, 7 y 8 se exponen las conclusiones a las que se llegaron con el desarrollo de la investigación; las recomendaciones que la complementan y que se sugieren para su continuación y la bibliografía que evidencia todas las referencias por medio de las cuales se plasmaron las bases teóricas y las demás investigaciones consultadas que sirvieron como una base y apoyo a toda la investigación.

1. GENERALIDADES

1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los sismos son fenómenos naturales, difícilmente predecibles y han venido presentándose en la corteza terrestre desde su creación, generando daños en las estructuras, vías, puentes, presas, etc y detonando otros procesos como fenómenos de remoción en masa, tsunamis, e incluso la pérdida de vidas humanas. Por esta razón resulta importante conocer el comportamiento dinámico que pueden llegar a presentar los materiales que conforman la superficie terrestre, rocas y suelos, ante la aplicación de cargas sísmicas, en especial estos últimos ya que en ocasiones pueden llegar a producir procesos de amplificación de ondas, lo cual aumentaría los efectos causados por el sismo.

La ciudad de Tunja se encuentra localizada en la cordillera oriental de los Andes, con una población estimada para el 2016 de 191.878 habitantes [1]. De acuerdo a la NSR 10 [2], Tunja presenta una amenaza sísmica Intermedia. En cuanto a su geología se tienen diferentes formaciones como lo son: Formación Tilata, Bogotá, Cacho, Guaduas, Labor y tierna, Plaeners y Conejo; con materiales como areniscas, limolitas, arcillolitas y liditas. También se encuentran Depósitos del cuaternario de tipo Coluvial, aluvial, fluvio- lacustre, lacustre y antrópicos.

Los depósitos de suelo se caracterizan por tener una composición bastante heterogénea y un comportamiento complicado al momento de modificar su condición natural de esfuerzos, en consecuencia no son muy buenos como material de soporte para el desarrollo de cualquier proyecto de ingeniería. Para el caso de la Ciudad de Tunja se tiene presencia de un depósito fluvio-lacustre, el cual está localizado a lo largo del eje del sinclinal, en su parte más baja y tomando una topografía plana, presentando orientación noreste - suroeste, y ocupando un gran porcentaje del área total de la ciudad.

Teniendo en cuenta todo lo anterior se plantea realizar la caracterización dinámica del depósito fluviolacustre de la ciudad de Tunja empleando ensayos de Bender Element, a partir de la caracterización y zonificación dinámica de la ciudad y del depósito, que existe para algunos suelos del perfil y en algunos sitios, con el fin de construir una caracterización dinámica más completa de todo el perfil de los suelos del depósito y finalmente lograr una mejor aproximación de su comportamiento dinámico.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Los suelos como material de soporte, siempre han sido un objeto de estudio desde el punto de vista ingenieril, para determinar propiedades físicas, mecánicas y dinámicas. Debido a la gran heterogeneidad que presenta en su composición y comportamiento, siempre se mantiene un grado de incertidumbre con estas caracterizaciones. Grado de incertidumbre que se puede disminuir al realizar un mayor número de ensayos tanto de campo como de laboratorio, pero que a su vez se ve limitado por los grandes costos que estos puedan llegar a generar.

La ciudad de Tunja desde el punto de vista geológico, cuenta con diferentes formaciones de tipo sedimentario, además presenta depósitos coluviales, aluviales y fluviolacustre, este último con una gran extensión y se encuentra localizado en la parte baja del sinclinal de Tunja. La presencia de estos depósitos puede llegar a generar efectos de sitio. A través del tiempo se han venido observando procesos de amplificación de ondas sísmicas o efectos de sitio en el Club Boyacá, el edificio de la Gobernación, la Catedral y el colegio Boyacá posiblemente por las características mecánicas de las formaciones superficiales del suelo, geometría de dichas formaciones o configuraciones especiales de suelos. Una situación análoga se presenta en la zona oriental de la ciudad, donde se localizan el antiguo Hospital de Tunja, hoy Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) y los cuarteles militares. En esta zona se presenta un cambio fuerte de topografía, el cual podría causar efectos de amplificación topográfica [3].

La NSR 10 [2] plantea perfiles de suelo y recomienda que ante la posibilidad de que el perfil del depósito no sea estable, especialmente ante la ocurrencia de un sismo, como puede ser en zonas de ladera o en sitios con suelos potencialmente licuables, hay necesidad de realizar una investigación geotécnica que identifique la estabilidad del depósito, además de las medidas correctivas, que se deben tomar para poder adelantar una construcción en el lugar.

Esta norma clasifica la ciudad de Tunja, con una amenaza sísmica intermedia, y a partir del perfil de suelo, da unos valores promedio de V_s . Teniendo en cuenta el tamaño de la ciudad y el crecimiento que se ha venido presentando, resulta necesario tener estudios más detallados sobre el comportamiento dinámico de la ciudad, especialmente en la zona del depósito, ya que de acuerdo a su condición es la zona más crítica ya que se pueden llegar a presentar efectos de sitio considerables como lo son: amplificación de las ondas sísmicas a causa de la composición del depósito como tal, o por la topografía de la ciudad.

Con el fin de contribuir al crecimiento del conocimiento sobre el comportamiento dinámico de la ciudad, se decide realizar la caracterización del depósito fluvio-lacustre de la ciudad de Tunja empleando ensayos de Bender Element, para obtener la velocidad de onda cortante (V_s) y velocidad de onda compresiva (V_p), con las cuales es posible determinar los demás parámetros que definen el comportamiento dinámico del suelo. De igual manera se esperan plantear curvas que relacionen la variación de las propiedades dinámicas con respecto a algunas propiedades físicas y así poder compararlas con las teóricas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Determinar los parámetros dinámicos de los suelos presentes en el depósito fluvio-lacustre de la ciudad de Tunja empleando ensayos de Bender Element.

1.3.2 Objetivos específicos

- Hacer una recolección de muestras de suelo tomadas del depósito fluvio-lacustre de la ciudad de Tunja.
- Determinar los valores de Velocidad de onda cortante (V_s) y Velocidad de onda compresiva (V_p) del suelo empleando ensayos de Bender Element, en su condición natural y para diferentes valores de saturación y relación de vacíos.
- Realizar ensayos físicos para determinar las propiedades índice de cada una de las muestras de suelo empleadas en los ensayos de Bender Element.
- Realizar ensayos triaxiales en los materiales más representativos del depósito.
- Plantear curvas que relacionen y muestren la variación de la velocidad de onda cortante (V_s) y la velocidad de onda compresiva (V_p) con respecto a propiedades estáticas.
- Obtener una zonificación de velocidad de onda cortante (V_s) y Velocidad de onda compresiva (V_p), obtenidas con el ensayo de Bender Element para los suelos del depósito fluvio-lacustre de la ciudad de Tunja.
- Analizar, comparar y establecer el comportamiento dinámico de los materiales presentes en el depósito fluvio-lacustre de la ciudad de Tunja, a partir de los resultados obtenidos en la presente investigación y otras investigaciones aplicadas a la zona de estudio.

1.4 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

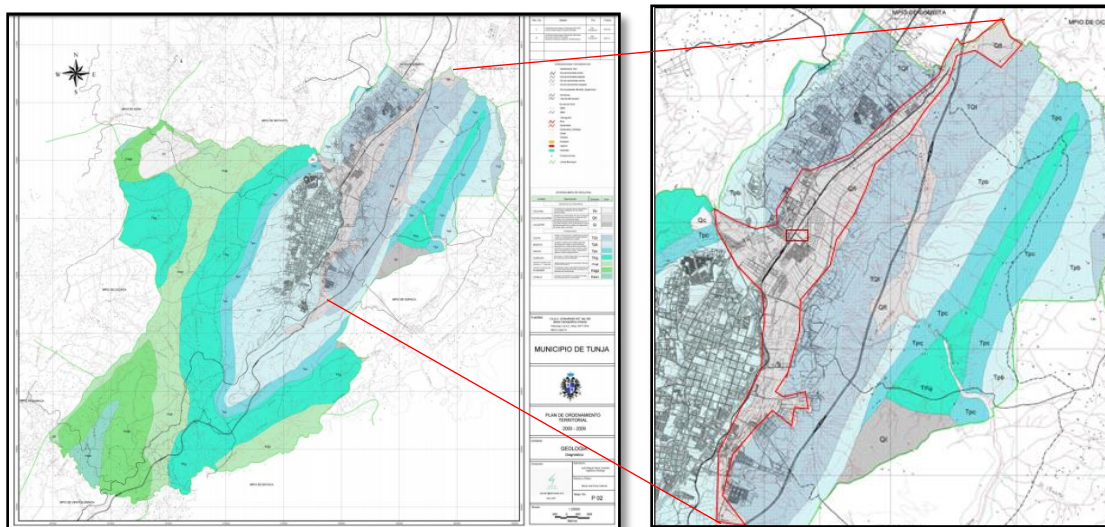
La zona de estudio se encuentra localizada en Colombia, en el departamento de Boyacá, en la ciudad de Tunja (Ver Figura 1). Su delimitación está dada por el depósito fluviolacustre que la atraviesa en sentido sur- norte, para su delimitación se utilizó la plancha geológica de la ciudad de Tunja, tal y como se muestra en la figura 2.

Figura 1. Localización Municipio de Tunja



[4] y [5]

Figura 2. Localización zona de estudio, mapa geológico de la ciudad de Tunja



[6]

Figura 3. Leyenda Mapa Geológico de la Ciudad de Tunja.

LEYENDA MAPA DE GEOLOGIA			
Unidad	Descripción	Simbolo	Color
DEPOSITOS CUATERNARIOS			
COLUVIAL	Constituido por grandes bloques depositados por gravedad, embebidos en una matriz arena arcillosa.	Qc	
FLUVIO-LACUSTRE	Depósitos no consolidados de limos constituidos por intercalaciones de arena y arcilla de color carmelita y con oxidaciones rojizas.	Qfl	
LACUSTRE	Gránulos de arenisca blanca de grano fino con una matriz arcillosa, chert, arcilla amarilla, arena arcillosa de grano fino a medio con fragmentos de arenas rojas y amarillas.	Ql	
FORMACIONES			
TILATA	Arenas y limos de color variable entre amarillo y rojizo, con intercalaciones conglomeráticas y frecuente estratificación cruzada.	TQt	
BOGOTA	Sucesión monótona de arcillolita agarrada de colores gris, violeta y rojo en bancos y separados por niveles de arenisca arcillosa.	Tpb	
CACHO	Arenisca cuarzoza de color amarillo a pardo oscuro, de grano fino a medio, presentando algunos niveles conglomeráticos.	Tpc	
GUADUAS	Areniscas y arcillas abigarradas con presencia de mantos de carbón explotable.	TKg	
GRUPO GUADALUPE LABOR Y TIERNA	Shales grises oscuros con pequeñas intercalaciones de areniscas.	Ksgl	
GRUPO GUADALUPE PLAENERS	Porcelanitas, chert y esporádicas fosforitas con una parte intermedia de arcilla y arenisca con presencia de foraminíferos.	Ksgp	
CONEJO	Areniscas intercaladas con niveles de shales de color gris oscuro a amarillento.	Kscn	

[6]

El depósito fluvio-lacustre, Qfl, de la ciudad de Tunja corresponde a depósitos no consolidados de limos constituidos por intercalaciones de arena y arcilla de color carmelita y con oxidaciones rojizas.[6]

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 MARCO CONCEPTUAL

En el desarrollo de los diferentes proyectos de ingeniería, es necesario partir de estudios geológicos que permitirán determinar la viabilidad del proyecto; complementados con estudios de caracterización geotécnica para poder determinar la resistencia del suelo y su comportamiento al aplicarle cargas; en algunas ocasiones también se realizan estudios de caracterización dinámica que permiten determinar el comportamiento del suelo al ser atravesado por ondas sísmicas, cuando estos últimos no se realizan, en los diseños de las obras, se tienen en cuenta factores o coeficientes sísmicos que permiten tener una mayor seguridad en el proyecto.

La presencia de terrenos, considerados geotécnicamente como blandos, próximos a la superficie del terreno produce un aumento considerable de los daños generados por terremotos en la infraestructura situada sobre ellos, al condicionar la amplificación de las ondas sísmicas en un rango de periodos de vibración (períodos altos) de los materiales, que coincide con el periodo de vibración de las estructuras. La respuesta y la magnitud de esa amplificación de la señal está controlada principalmente por las propiedades geotécnicas de los materiales geológicos, especialmente por sus características dinámicas, así como el espesor de las capas y la profundidad a la que se encuentra el sustrato rocoso [7].

2.1.1 Comportamiento dinámico del suelo:

La velocidad de propagación de las ondas sísmicas depende de la densidad y propiedades elásticas de la roca y del material a través del cual se transmiten [8].

Entre las principales consecuencias que se pueden presentar en la corteza terrestre, a causa de la ocurrencia de un evento sísmico se tienen grandes pérdidas de tipo humano y económico, así mismo muchos de los daños producidos no son de manera directa o instantánea, sino que también pueden generarse procesos geológicos como fenómenos de remoción en masa, los cuales serían causantes de nuevos daños.

En depósitos de arena saturados, ante la ocurrencia de un sismo puede generarse un proceso geológico conocido como licuación, el cual permite que el agua contenida en el material fluya a la superficie, produciendo una condición de arenas movedizas. Fenómeno que puede ocasionar que los edificios se hundan o se inclinen de manera excesiva. En algunas ocasiones pueden generarse efectos de sitio, por ejemplo en suelos blandos se presentan amplificaciones de la onda sísmica o cuando existen variaciones topográficas, como es el caso de valles, también se presenta amplificación en cercanías a la corona de los taludes que tiende a aumentar con la pendiente.

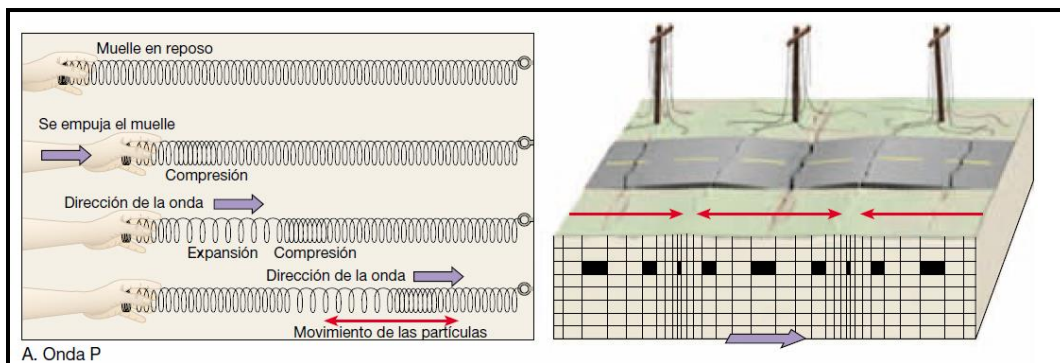
El comportamiento dinámico del suelo está determinado por sus propiedades dinámicas:

- Velocidad de onda cortante (V_s)
- Velocidad de onda compresiva (V_p)
- Módulo de cortante máximo (G_{max})
- Factor de Amortiguamiento (λ)
- Coeficiente de Poisson (ν)

Cuando se produce un terremoto, la energía liberada se convierte en ondas sísmicas de dos tipos: ondas de cuerpo que son las que se propagan en el interior de la corteza y las ondas superficiales que se generan cuando las ondas de cuerpo llegan a la superficie terrestre [9]. Las ondas de cuerpo se dividen en dos:

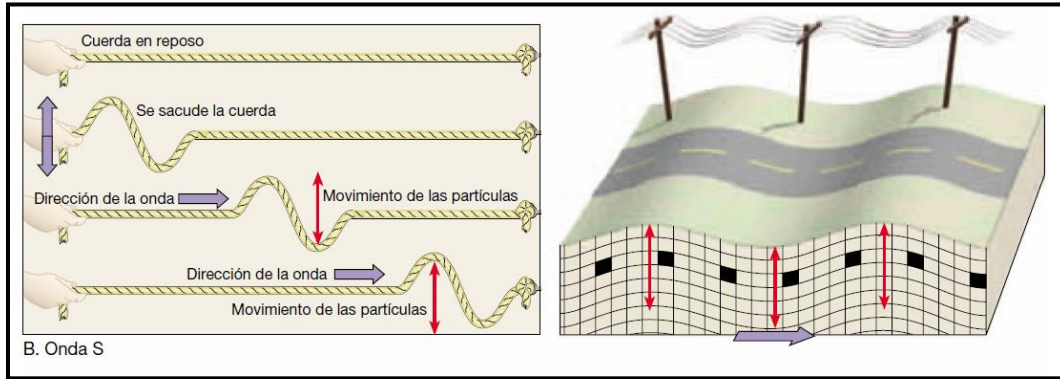
- Ondas P son ondas que empujan (comprimen) y tiran (expanden) de las rocas en la dirección de propagación de la onda, ver Figura 4. Los sólidos, los líquidos y los gases se oponen a un cambio de volumen cuando son comprimidos y recuperan elásticamente su fuerza cuando cesa la fuerza; por lo tanto las ondas P pueden atravesar todos esos materiales [9].
- Ondas S sacuden las partículas en ángulo recto con respecto a la dirección en la que viajan y cambian transitoriamente la forma del material que las transmite, ver Figura 5. Dado que los gases y líquidos no responden elásticamente a cambios de forma, no transmitirán las ondas S [9].

Figura 4. Propagación onda P



[9]

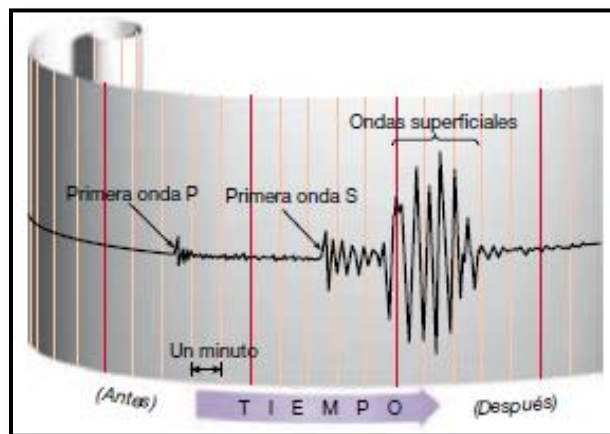
Figura 5. Propagación onda S



[9]

En la figura 6 se muestra un sismograma típico en donde se puede observar que la llegada de la onda S a la superficie ocurre en un tiempo más corto en comparación con el tiempo de llegada de la onda P, es decir que las velocidades de onda, V_p son mayores a las velocidades de onda V_s . [9]

Figura 6. Sismograma típico



[9]

2.1.2 Determinación de los parámetros dinámicos del suelo:

Para la determinación de las propiedades dinámicas del suelo existen diferentes ensayos de campo y laboratorio, cada uno de ellos con ciertas limitaciones. Las ventajas de las técnicas de laboratorio radican en su economía, la relativa facilidad con la que las variables de ensayo se pueden variar, así como la definición de las condiciones de frontera, su principal desventaja radica en la alteración provocada por los procedimientos de muestreo, transporte, almacenamiento y ensayo. Las ventajas de los ensayos de campo, es que no requieren muestreo, lo cual evita que pueda alterarse las propiedades de esfuerzos, químicas, termales y condiciones estructurales de los especímenes de suelo [10].

a) Ensayos de campo:

De baja deformación:

- Ensayo de reflexión sísmica
- Ensayo de refracción sísmica
- Cross-Hole
- Down-Hole (Up-Hole)
- Cono sísmico

De alta deformación:

- Ensayo de penetración estándar (SPT)
- Ensayo de penetración de cono (CPT)
- Ensayo del dilatómetro
- Ensayo del presurómetro

b) Ensayos de laboratorio:

De baja deformación:

- Ensayo de Columna resonante
- Ensayo de pulso ultrasónico
- Ensayo piezoeléctrico de Bender Element

De alta deformación:

- Ensayo de triaxial cíclico
- Ensayo de corte directo simple Cíclico
- Ensayo de corte cíclico torsional
- Ensayo de mesa vibratoria
- Ensayo de Centrifuga

En la siguiente tabla se relacionan algunos de los ensayos empleados para determinar el comportamiento dinámico del suelo, cada uno de ellos maneja diferentes rangos de deformación:

Tabla 1. Rango y características de los ensayos de laboratorios.

Ensayo	Rango de frecuencia	Rango de deformación angular	Rango de velocidad de deformación angular
	f(Hertz)	γ (%)	$\dot{\gamma}$ (1/s)
Triaxial cíclico (L)	0.2 - 5	10^{-2} - 5	0.8×10^{-4} - 1
Corte simple cíclico (L)	0.2 - 5	10^{-2} - 5	0.8×10^{-4} - 1
Torsión cíclica (L)	0.2 - 5	10^{-2} - 5	0.8×10^{-4} - 1
Columna resonante (L)	50 - 200	10^{-4} - 10^{-2}	2×10^{-4} - 8×10^{-2}
Refracción sísmica (C)	20 - 100	10^{-4} - 10^{-3}	0.8×10^{-4} - 0.4×10^{-2}
Cross-hole, Down-hole y Up-hole (C)	20 - 100	10^{-4} - 10^{-3}	0.8×10^{-4} - 0.4×10^{-2}
Vibración forzada en bloques o placas (C)	<50	10^{-4} - 10^{-1}	$<2 \times 10^{-3}$ - $<2 \times 10^{-1}$
Ensayo de placa cíclico (C)	<0.1	10^{-2} - 5	$<0.4 \times 10^{-4}$ - $<2 \times 10^{-2}$
Vibración forzada en placa atomillada (C)	<50	10^{-2} - 5	2×10^{-3} - 2×10^{-1}
Solicitaciones en:			
Máquinas (buen diseño de cimentación)	3 - 50	10^{-2} - 10^{-3}	1.2×10^{-5} - 2×10^{-3}
Sismos con foco transcurso	3 - 5	Depende del suelo, solicitaciones de interacción suelo-estructura, degradación por licuación, etc.	
Sismos con foco subductivo	10 - 15		
Olas	<0.2		

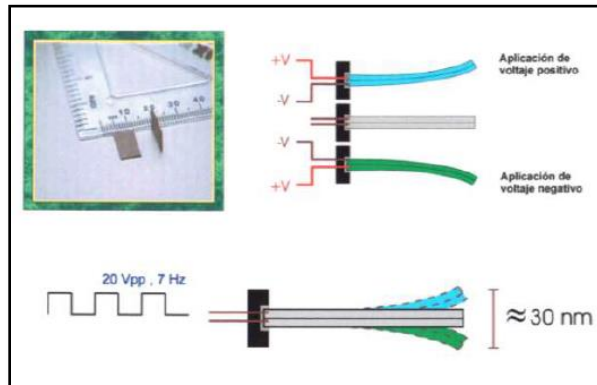
(L) = Laboratorio; (C) = Campo

[11]

Para esta investigación se plantea el desarrollo de ensayos Bender Element sobre muestras de suelo inalteradas, tomadas del depósito Fluvio Lacustre de la Ciudad de Tunja. Por medio de este ensayo es posible determinar velocidades de onda cortante (V_s) y velocidades de onda compresiva (V_p).

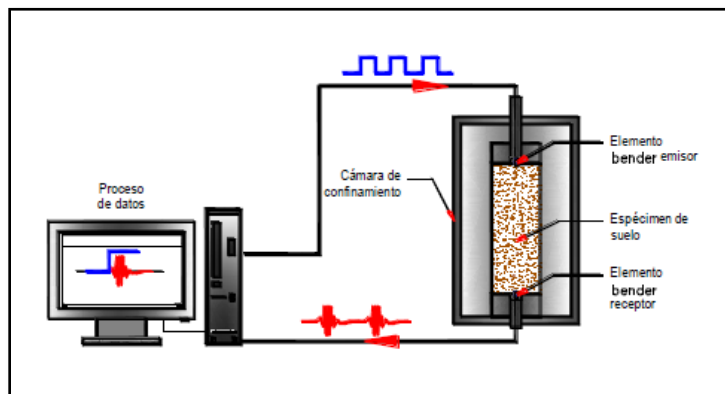
El ensayo de Bender Element consiste en insertar un elemento Bender en el extremo del espécimen de suelo como emisor y el otro en el extremo opuesto del espécimen, como receptor. Con un generador de pulsos, se envía un pulso al elemento emisor, lo cual genera una onda cortante, que se propaga a través del espécimen hasta el otro elemento Bender, el cual detecta la llegada del pulso. Se mide el tiempo t , necesario para la propagación del pulso elástico generado, a través del espécimen de suelo de longitud, L . Lo anterior permite conocer la velocidad de propagación del pulso generado en el espécimen de estudio [10].

Figura 7. Elemento Bender.



[11]

Figura 8. Montaje Ensayo Bender Element.



[11]

Con los resultados del ensayo es posible determinar los parámetros dinámicos de un material empleando las siguientes expresiones:

- Módulo de rigidez máximo (G_{max}):

$$G_{max} = \rho * V_s^2 \quad [MPa]$$

- La relación de Poisson:

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}$$

- Módulo de Elasticidad:

$$E = 2 * G_{max} * (1 + \nu)$$

En donde:

ρ = Densidad del Suelo (kg/m^3)

V_s = Velocidad Cortante del Suelo (m/s)

Para una relación de Poisson típica de 0,3 para materiales geológicos, la relación $V_p/V_s=1,87$ [1]

Existen diferentes correlaciones que permiten determinar valores empíricos de los parámetros dinámicos del suelo a partir de valores de N de SPT, del índice de plasticidad (IP) y de la relación de sobreconsolidación (OCR)

Tabla 2. Correlaciones de V_s y N de SPT

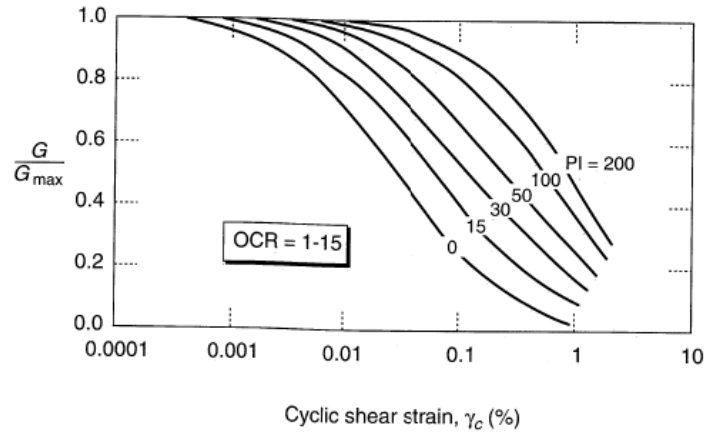
Author(s)	I.D.	All soils	Sand	Silt	Clay
Shibata (1970)	A	–	$V_s = 31.7N^{0.54}$	–	–
Ohba and Toriuma (1970)	B	$V_s = 84N^{0.31}$	–	–	–
Imai and Yoshimura (1975)	C	$V_s = 76N^{0.33}$	–	–	–
Ohta et al. (1972)	D	–	$V_s = 87.2N^{0.36}$	–	–
Fujiwara (1972)	E	$V_s = 92.1N^{0.337}$	–	–	–
Ohsaki and Iwasaki (1973)	F	$V_s = 81.4N^{0.39}$	–	–	–
Imai et al. (1975)	G	$V_s = 89.9N^{0.341}$	–	–	–
Imai (1977)	H	$V_s = 91N^{0.337}$	$V_s = 80.6N^{0.331}$	–	$V_s = 80.2N^{0.292}$
Ohta and Goto (1978)	I	$V_s = 85.35N^{0.348}$	–	–	–
Seed and Idriss (1981)	J	$V_s = 61.4N^{0.5}$	–	–	–
Imai and Tonouchi (1982)	K	$V_s = 96.9N^{0.314}$	–	–	–
Sykora and Stokoe (1983)	L	–	$V_s = 100.5N^{0.29}$	–	–
Jinan (1987)	M	$V_s = 116.1(N + 0.3185)^{0.202}$	–	–	–
Okamoto et al. (1989)	N	–	$V_s = 125N^{0.3}$	–	–
Lee (1990)	O	–	$V_s = 57.4N^{0.49}$	$V_s = 105.64N^{0.32}$	$V_s = 114.43N^{0.31}$
Athanasopoulos (1995)	P	$V_s = 107.6N^{0.36}$	–	–	$V_s = 76.55N^{0.445}$
Sisman (1995)	Q	$V_s = 32.8N^{0.51}$	–	–	–
Iyisan (1996)	R	$V_s = 51.5N^{0.516}$	–	–	–
Kanai (1996)	S	$V_s = 19N^{0.6}$	–	–	–
Jafari et al. (1997)	T	$V_s = 22N^{0.85}$	–	–	–
Kiku et al. (2001)	U	$V_s = 68.3N^{0.292}$	–	–	–
Jafari et al. (2002)	V	–	–	$V_s = 22N^{0.77}$	$V_s = 27N^{0.73}$
Hasancebi and Ulusay (2006)	W	$V_s = 90N^{0.309}$	$V_s = 90.82N^{0.319}$	–	$V_s = 97.89N^{0.269}$
Ulugergerli and Uyank (2007)	X	$V_{SU} = 23.291 \ln(N) + 405.61$	–	–	–
Ulugergerli and Uyank (2007)	Y	$V_{SL} = 52.9e^{-0.011N}$	–	–	–
Dikmen (2009)	Z	$V_s = 58N^{0.39}$	$V_s = 73N^{0.33}$	$V_s = 60N^{0.36}$	$V_s = 44N^{0.48}$
Pitilakis et al. (1999)	AA	–	$V_s = 145(N_{60})^{0.178}$	–	$V_s = 132(N_{60})^{0.271}$
Hasancebi and Ulusay (2006)	AB	$V_s = 104.79(N_{60})^{0.26}$	$V_s = 131(N_{60})^{0.205}$	–	$V_s = 107.63(N_{60})^{0.237}$

The difference between static and dynamic loading is that the second induces very small shear strain less than the elastic strain of 0.001%, while shear strains for static loading of foundations are generally in the range of 0.1–0.01% [2]. Several studies have shown that the shear modulus decreases dramatically with increasing shear strain. Empirical modulus reduction schemes have been developed to show the relation between G/G_{max} and shear strain, Fig. 1 [3]. These curves can be used to solve dynamic problems when shear strains drive the soil beyond its elastic range.

[12]

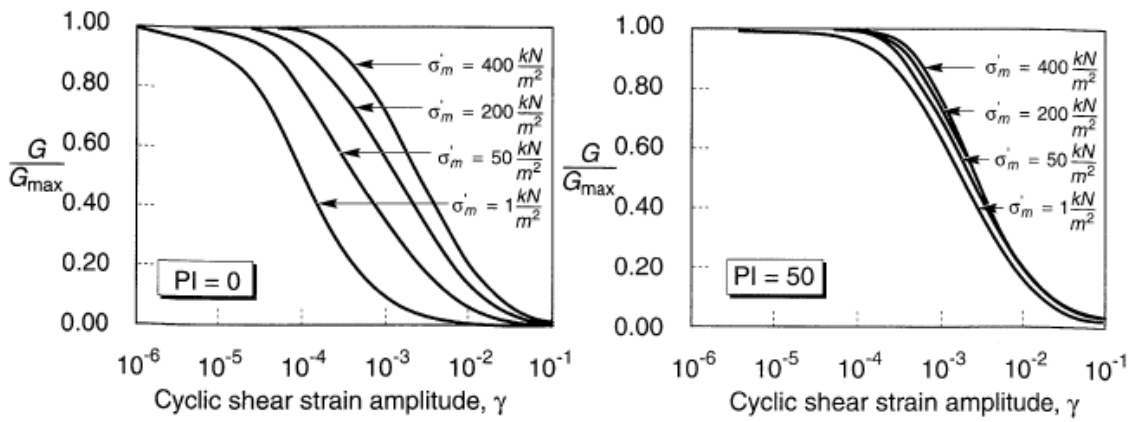
Las curvas dinámicas de un suelo representan la variación de G/G_{max} vs deformación cíclica cortante y la variación del coeficiente de amortiguamiento vs deformación cíclica cortante. En las Figuras 9, 10 y 11 se presentan curvas teóricas en donde se observa la influencia del índice de plásticidad y la relación de sobre consolidación sobre su comportamiento.

Figura 9. Curvas del módulo de reducción para suelos finos de diferente plasticidad.



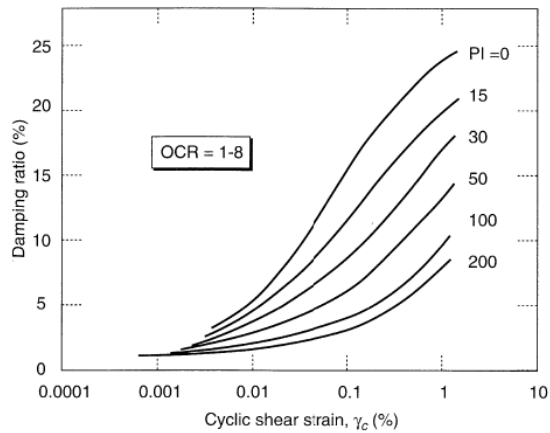
[10]

Figura 10. Influencia de la presión efectiva de confinamiento en las curvas del módulo de reducción.



[10]

Figura 11. Variación del coeficiente de amortiguamiento para suelos finos



[10]

2.2 ESTADO DEL ARTE

Conocer el comportamiento dinámico del suelo resulta cada día ser un tema de mayor importancia teniendo en cuenta el gran número de daños que se pueden llegar a presentar en las diferentes obras de ingeniería a causa de la ocurrencia de un sismo. Cada uno de los tipos de rocas que existen en la corteza terrestre tiene un comportamiento dinámico específico y fácilmente predecible a partir de caracterizaciones dinámicas.

En el caso de los suelos, especialmente en zonas de depósito, la determinación de este comportamiento dinámico ya no resulta ser tan sencillo. Los suelos por ser agrupaciones de sedimentos o partículas de diferentes tamaños, pueden llegar a presentar un comportamiento más complejo a causa de efectos de sitio (amplificación de ondas sísmicas por efectos topográficos o por el depósito como tal), procesos de licuación (en arenas saturadas o en estado suelto) o compactación dinámica (arenas). En este proyecto se realizará una caracterización dinámica del depósito fluvio lacustre de la Ciudad de Tunja

A continuación se muestran investigaciones de orden mundial, nacional y regional que contribuyen a la caracterización dinámica del Depósito Fluvio-lacustre de la Ciudad de Tunja empleando ensayos Bender Element; estas investigaciones se dividieron en tres sub- temáticas para facilitar su comprensión:

2.2.1 Ensayo Bender Element

J.-S. Lee and J. C. Santamarina, (2005) escribieron sobre el “*Bender Elements: Performance and Signal Interpretation*” [13]. En su investigación emplearon métodos experimentales y analíticos para explorar varios aspectos de la instalación de los elementos Bender como: la prevención de acoplamiento electromagnético, directividad, frecuencia de resonancia, detección de la primera llegada y efectos de campo cercanos. Estos aspectos muestran que los efectos del acoplamiento electromagnético son críticos en suelos con alta conductividad eléctrica y pueden ser minimizados por blindaje y toma de tierra, o usando elementos Bender de tipo paralelo. La frecuencia resonante de las instalaciones de los elementos Bender depende de la geometría de los elementos Bender, la eficiencia del ancho y la rigidez del suelo.

En el 2010, J. K. Ā and B. N. Madhusudhan realizan “ *A note on the measurement of travel times using bender and extender elements*” [14]. En su investigación realizan la medición de la velocidad de onda cortante y compresiva (V_s y V_p) en muestras de arena seca, para densidades y presiones de confinamiento distintas; a su vez trabajan tres métodos distintos en la interpretación de las señales medidas durante el ensayo (Dominio del Tiempo, Primero pico a pico y correlación cruzada). Todos los métodos arrojan una única respuesta en la medición de la onda P, mientras que para la onda S pasa todo lo contrario debido al efecto del campo cercano. Los autores realizan ensayos de columna resonante en modo torsional, donde comprobaron indirectamente el tiempo de viaje de la onda cortante y comprueban que la onda S es más exacta en función del tiempo de llegada medido para la onda P.

Tabla 3. Valores de L/λ para varios casos de estudio con frecuencia de entrada desde 10kHz en la señal de onda cortante medida.

Relative density (%)	L/λ		
	$\sigma_3 = 100$ kPa	$\sigma_3 = 300$ kPa	$\sigma_3 = 500$ kPa
40	4.10	3.30	2.84
50	3.86	3.09	2.67
60	3.77	2.97	2.62
70	3.52	2.84	2.50
80	3.29	2.80	2.44

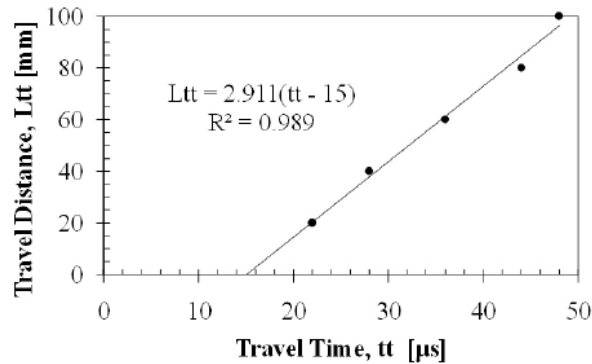
L = length of wave path travel, λ = wavelength.

[14]

En 2012, J. Camacho-Tauta, J. Jiménez, and O. Reyes-Ortiz escriben sobre “ *A procedure to calibrate and perform the Bender Element Test*” [15]. En este artículo plantean el mejoramiento del ensayo teniendo en cuenta que no existe una norma para su ejecución y que aun siendo un ensayo tan sencillo de realizar es bastante sensible a factores externos. Entre los factores que allí se mencionan que influyen en la confiabilidad de los resultados obtenidos a partir del ensayo Bender Element, se tienen: efecto de campo cercano, directividad, distancia de viaje, incidencia de los límites, geometría y tamaño de la muestra y por ultimo diafonía. Dichos factores son agrupados en tres categorías que son: la calidad de fabricación e instalación; el acoplamiento y alineación de los elementos Bender en la muestra y los efectos de tamaño de muestra y de campo cercano.

Para la calibración del equipo realizaron ensayos sobre varillas de aluminio de diferentes longitudes, en donde los elementos no quedaban dentro de la varilla pero si en contacto con ellas, obteniendo de cada ensayo los tiempos de viaje de la onda. Producto de este experimento se obtuvo un retardo de tiempo en la propagación de la onda tal y como se muestra en la Figura 12. El retardo se representa por la intersección de la gráfica con el eje x; la pendiente de la línea corresponde a la velocidad de onda cortante.

Figura 12. Estimación del tiempo de retraso del equipo.



[15]

La Tabla 4 contiene las propiedades físicas de las dos muestras de arena utilizadas.

Tabla 4. Propiedades físicas de los especímenes ensayados.

Specimen	Maximum grain size	Minimum grain size	C_u	C_c	G_s	Initial height	Initial diameter	Dry mass	Initial void ratio
	[mm]	[mm]	[.]	[.]	[.]	[cm]	[cm]	[g]	[.]
1	0.425	0.180	1.58	0.93	2.67	14.2	7.0	836.11	0.745
2	0.850	0.425	1.42	0.94	2.67	14.2	7.0	863.44	0.690

[15]

En la tabla 5 se muestran los resultados obtenidos por medio del ensayo Bender Element para las dos muestras de arena, a diferentes presiones de confinamiento.

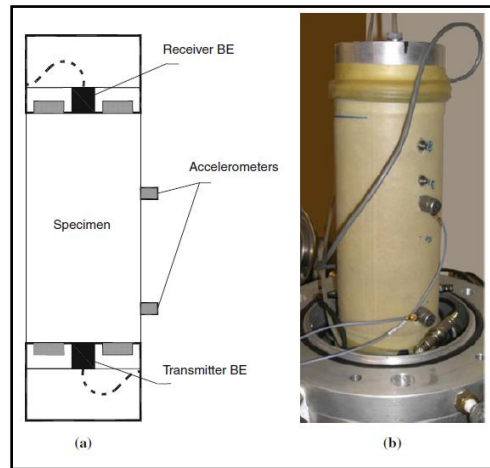
Tabla 5. Resultados de los ensayos Bender Element

p'	δv	f	tt	G_o	L_{TT}/λ
[kPa]	[mm]	[kHz]	[μs]	[MPa]	[.]
Specimen 1					
50	0.0	11.27	617	69.2	7.0
100	0.0	13.10	541	90.0	7.1
200	0.1	15.60	453	128.2	7.1
400	0.2	18.70	373	189.0	7.0
Specimen 2					
50	0.0	8.90	635	67.4	5.7
100	0.1	12.40	545	91.5	6.8
200	0.2	14.90	449	134.7	6.7
400	0.3	15.50	365	203.6	5.7

[15]

C. Ferreira, J. P. Martins, and A. Gomez escriben sobre “*Determination of the Small-Strain Stiffness of Hard Soils by Means of Bender Elements and Accelerometers*” [16]. En la investigación realizada por los autores, hacen mediciones de velocidades de onda cortante sobre muestras de suelo empleando elementos Bender y acelerómetros simultáneamente. En la Figura 13 se presenta el montaje del ensayo, indicando la posición de los elementos Bender y de los acelerómetros utilizados.

Figura 13. Instalación de los elementos Bender y los acelerómetros en el espécimen de suelo
 a. Esquemáticamente b. Fotografía del montaje



[16]

La Tabla 6 contiene los valores de tiempo de viaje de la onda, velocidad de onda cortante (V_s) y Módulo de rigidez inicial obtenidos por medio del Ensayo Bender Element y los acelerómetros, para diferentes presiones de confinamiento.

Tabla 6. Resumen comparativo de los resultados del Bender Element y los Acelerómetros

Test method	Parameter	Confining pressure (kPa)			
		0 ^a	100	200	300
BE	t (ms)	4.25	0.74	0.60	0.50
	V_s (m/s)	47.1	270.3	333.3	400
	G_0 (MPa)	4.4	145.5	221.2	318.6
AC	t (ms)	1.98	0.36	0.28	0.24
	V_s (m/s)	50.5	277.8	357.1	416.7
	G_0 (MPa)	5.1	153.4	253.9	345.7
Δ	V_s (m/s)	7 %	3 %	7 %	4 %
	G_0 (MPa)	14 %	5 %	13 %	8 %

Δ : differences between BE and AC

^a Unconfined

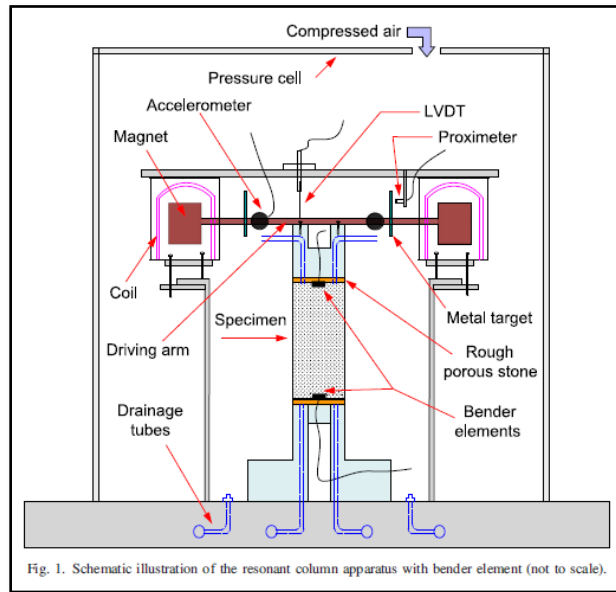
[16]

En el documento los autores concluyen que los valores de velocidades de onda cortante obtenidos por medio del ensayo Bender son muy similares a los obtenidos por medio de los acelerómetros (Ver tabla 6), lo que permite validar el principio de funcionamiento del ensayo Bender Element.

De igual manera, durante el programa de prueba fue posible observar que con el aumento de la rigidez (inherente o inducido por el estado de esfuerzos), la interpretación y la confiabilidad de las medidas BE disminuyó. Por otro lado, que el rendimiento de los acelerómetros es relativamente independiente de la rigidez del material ensayado.

En 2013 X. Gu, J. Yang, and M. Huang, escriben un artículo titulado “*Laboratory measurements of small strain properties of dry sands by bender element*” [16], en donde se presentan los resultados obtenidos por medio del ensayo Bender Element en tres tipos de arenas que son: Toyoura, Fujian y Leighton Buzzard. El equipo en el cual se desarrollaron los ensayos corresponde al del ensayo de Columna Resonante con la adaptación del Bender Element. En la figura 14 se puede ver la representación del montaje utilizado y en la Tabla 7 las propiedades de las arenas ensayadas.

Figura 14. Ilustración esquemática del equipo de columna resonante con los Elementos Bender



[17]

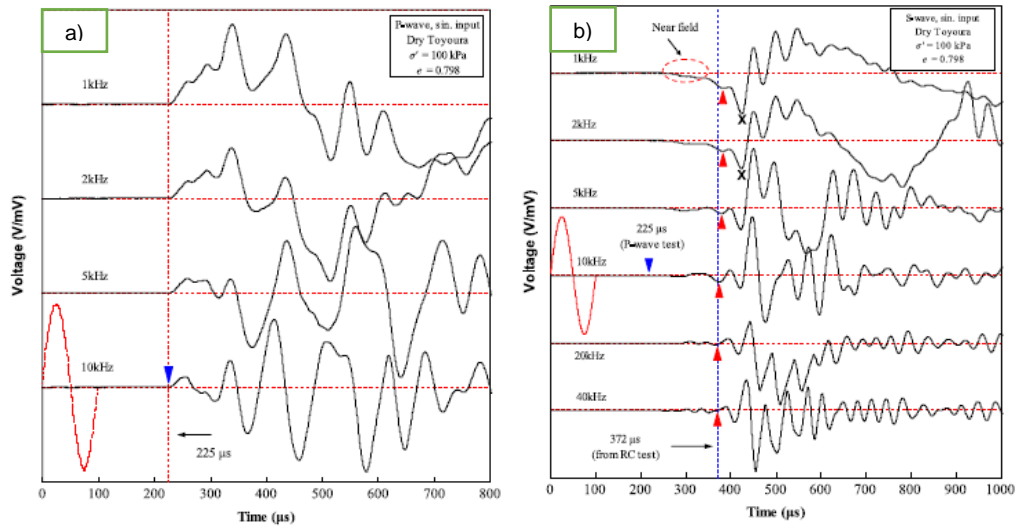
Tabla 7. Propiedades principales de las tres arenas ensayadas

Sand	G_s	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	C_u	C_c	e_{max}	e_{min}
Toyourea	2.64	0.166	0.216	0.231	1.392	0.971	0.967	0.633
Fujian	2.65	0.282	0.397	0.432	1.532	0.977	0.879	0.555
LB	2.65	0.620	0.840	0.900	1.452	0.937	0.791	0.523

[17]

En el desarrollo del artículo se comparan los resultados de muestras de arena con la misma presión de confinamiento y relación de vacíos, sometidas a distintas frecuencias durante la ejecución del ensayo Bender Element. En esta comparación se observa como la identificación de la llegada de la onda P resulta más sencilla para las diferentes frecuencias empleadas, en comparación con la onda S, en donde a medida que la frecuencia se hace más grande, el tiempo de viaje de la onda se hace más pequeño. Para el caso de la onda P, sin importar la frecuencia a la cual se realice el ensayo, el tiempo de viaje de la onda es el mismo. Ver Figura 15

Figura 15. Resultados en arena seca de Toyoura a) Onda P b) Onda S

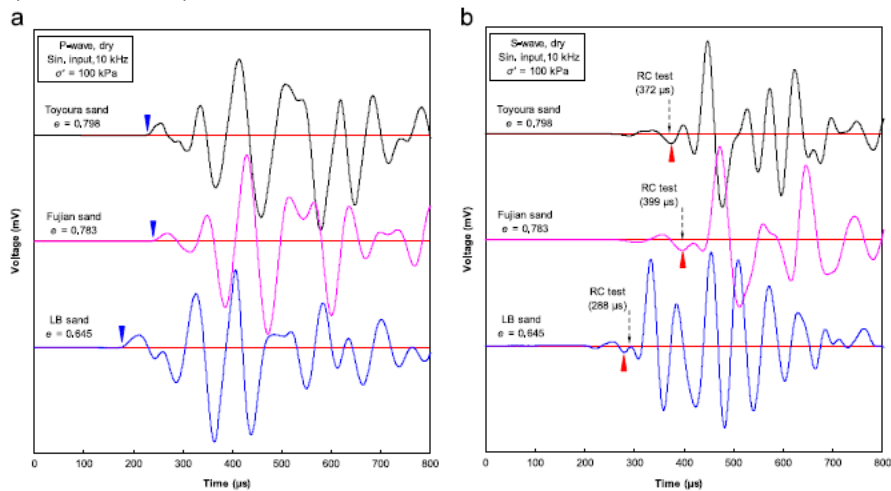


[17]

De igual manera se comparan los resultados de los tres tipos de arena empleados, bajo las mismas condiciones de entrada. Ver Figura 16.

Figura 16. Comparación de señales recibidas en tres arenas.

a) Onda P b) Onda s



[17]

En la Figura 16 se observa que las características de las señales de onda recibidas son similares, aunque los tiempos de viaje de la onda son diferentes. Similar a la Arena de Toyoura, los valores de G_0 de las pruebas de Bender Element también están de acuerdo con los de las pruebas de columna resonante y corte torsional para las arenas Fujian y Leighton Buzzard. Estos resultados confirman convincentemente la confiabilidad de la interpretación de la señal y el sistema de prueba de los Ensayos Bender Element.

Por otro lado, C. Ferreira, A. Viana de Fonseca, and J. A. Santos escriben "*Comparison of simultaneous Bender Elements and Resonant Column Tests on Porto Residual Soil*" [18]. En su artículo exponen que los elementos Bender son unas herramientas de laboratorio muy útiles que permiten determinar la velocidad de onda cortante; tienen grandes ventajas como la simplicidad y facilidad en su uso, sin embargo no existe un estándar para la interpretación de los resultados, lo que genera gran incertidumbre. Existen diferentes planteamientos sobre su interpretación en el dominio del tiempo o dominio de las frecuencias. En su investigación implementaron los elementos Bender en el equipo de columna resonante lo cual permite que las velocidades de onda sean mediadas independientemente, diferentes metodologías de interpretación de los resultados de Bender Element pueden ser aplicadas.

De igual forma, J. Camacho-Tauta, J. Jiménez, and O. Reyes-Ortiz escriben "*Comparison between resonant – column and Bender Element test on three types of soils*" [19]. Teniendo en cuenta que diferentes factores afectan la confiabilidad del método del ensayo Bender Element, principalmente debido a la complejidad del fenómeno de propagación de ondas en un volumen tan pequeño como el que se emplea para el ensayo. Se ensayaron tres tipos de suelo mediante el ensayo de columna resonante (RC) y dos tipos de ensayo Bender Element (BE): en dominio del tiempo (BETD) y en el dominio de las frecuencias (BEFD). Los resultados sugieren que en suelos no plásticos la rigidez se tiende a ser subestimada en comparación con la rigidez obtenida mediante el ensayo de columna resonante. El ensayo Bender Element en dominio del tiempo puede verse afectado por la plasticidad del suelo.

En la Tabla 8 se presentan los resultados de velocidad de onda cortante obtenidos en la investigación, para los diferentes ensayos propuestos.

Tabla 8. Velocidad de onda cortante determinada por tres métodos, para diferentes presiones de confinamiento.

σ'_3 (kPa)	Test	Specimen		
		1	2	3
100	RC	230	193	179
	BETD	214	194	205
	BEFD	187	166	214
200	RC	260	238	231
	BETD	246	245	251
	BEFD	215	203	241
400	RC	289	291	296
	BETD	288	304	326
	BEFD	231	242	331

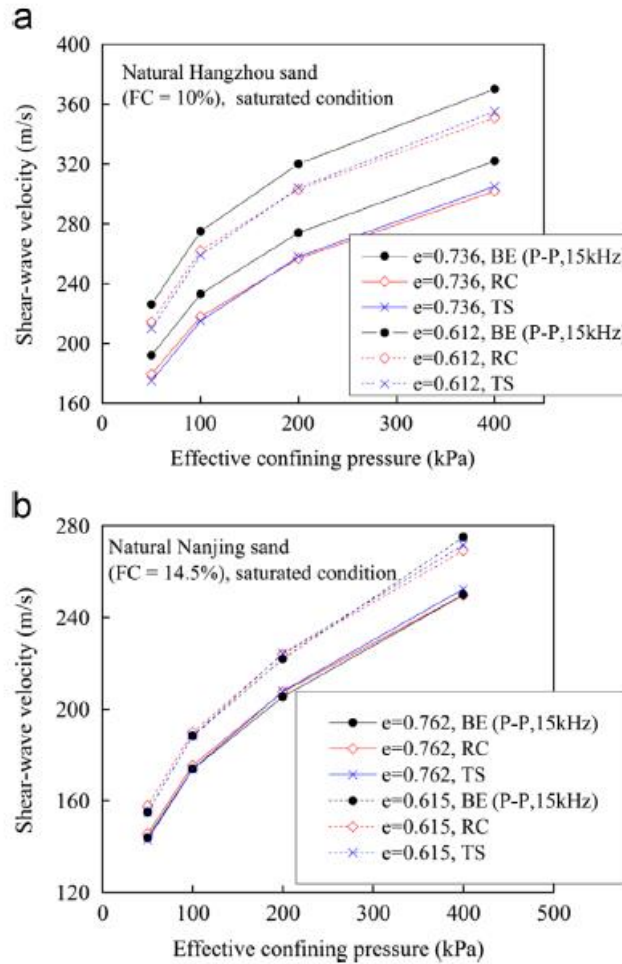
[19]

X. Gu, J. Yang, M. Huang, and G. Gao, escriben sobre “*Bender element tests in dry and saturated sand: Signal interpretation and result comparison*” [20]. En su investigación realizan ensayos en arenas secas y saturadas, para varias presiones de confinamiento y densidades, usando elementos Bender incorporados en un equipo de columna resonante. A partir de los resultados obtenidos concluyen que:

- La diferencia en los valores de G_0 obtenidos por diferentes métodos de interpretación de los ensayos Bender Element son principalmente asociados a las diferencias en el componente de la frecuencia y las ondas en medio de las señales de entrada y salida.
- La dispersión de la onda S comienza a existir en muestras de arena saturadas en los ensayos Bender Element y esto principalmente depende de la permeabilidad del suelo.
- Los valores de G_0 de las muestras secas en los ensayos Bender Element, columna resonante y corte torsional cíclico son consistentes con la condición saturada.

En el 2014 Y. Cai, Q. Dong, J. Wang, C. Gu, and C. Xu, realizaron una “*Measurement of small strain shear modulus of clean and natural sands in saturated condition using bender element test*” [21]. En su investigación ensayan una muestra limpia y dos naturales, para identificar las variaciones en las velocidades de onda cuando la arena presenta contenido de finos. Los resultados de la velocidad de onda cortante (V_s) obtenidos con los ensayos de Bender Element, Columna Resonante y Corte Torsional muestran una diferencia aproximada del 3%. Los valores de velocidad cortante obtenidos en la arena natural, indican que el contenido de finos genera un efecto importante en la conductividad hidráulica, lo cual afecta el movimiento relativo del impulso en medio de las partículas de suelo y agua al trabajar con altas frecuencias. A continuación se muestran los impulsos obtenidos para los dos casos: arena limpia y arena natural.

Figura 17. Variación de V_s con el esfuerzo de confinamiento efectivo para a) arena natural de Hangzhou y b) arena natural de Nanjing bajo condición saturada



[21]

Los investigadores T. Kim, D. G. Zapata-Medina, and C. A. Vega-Posada, en el 2014, realizan un “*Analysis of Bender Element signals during triaxial testing*” [22]. En su investigación analizan los resultados de la prueba de Bender Element empleando tres métodos de interpretación distintos (el tiempo de viaje pico a pico, la correlación cruzada y la fase de retardo con enfoque) para obtener la velocidad de onda cortante (V_s) y determinar el error en su propagación cuando el dominio del tiempo y de la frecuencia son implementados. En esta investigación concluyen que cuando las condiciones del ensayo son adecuadas, la diferencia de los resultados de velocidad de onda cortante obtenidos por los tres métodos de interpretación es muy pequeña; en general los elementos Bender podrían usarse adecuadamente y dar resultados confiables siempre que $d/\lambda_s > 2$. (d = distancia de viaje, λ_s = longitud de onda de la señal de entrada)

En el 2015 T. Ogino, T. Kawaguchi, S. Yamashita, and S. Kawajiri realizan una investigación sobre “*Measurement deviations for shear wave velocity of bender element test using time domain, cross-correlation, and frequency domain approaches*” [23]. En esta investigación utilizan las técnicas del dominio del tiempo (TD), correlación cruzada (CC), y dominio de la frecuencia (FD), para estimar los tiempos de viaje en muestras en las cuales se realizaron mediciones con ensayos Bender Element. Los resultados experimentales revelaron que la técnica CC puede proporcionar valores razonables del tiempo de viaje por el pico máximo para suelos blandos, mientras que es difícil de aplicar a suelos arenosos o tratados artificialmente debido a que el punto de llegada incierto. Con la investigación experimental y el análisis numérico de CC, se demuestra la dependencia de la frecuencia del tiempo de viaje.

Como resultado de la estimación del tiempo de viaje utilizando señales de barrido de frecuencia, fuerte dispersión y dispersión de velocidades de fase y de grupo, debido a la no linealidad del sistema de prueba están indicados en la técnica de FD.

La técnica FD subestima ampliamente la velocidad de la onda de corte en comparación con la técnica TD, una tendencia mostrada en la mayoría de las muestras de suelo. En la Tabla 9 se presentan los resultados de velocidad de onda cortante determinados por medio de ensayos Bender con las diferentes metodologías propuestas para la interpretación de los tiempos de viaje.

Tabla 9. Resultados obtenidos de la velocidad de onda cortante (V_s) en m/s, con las tres técnicas planteadas

Summary of mean values of shear wave velocities (m/s).

Sample	Ebetsu peat	Akita peat	Ebetsu organic clay	Pisa clay	NSF clay	Inagi sand	Toyoura sand	Glass bead 0.4 mm	Glass bead 2 mm	Artificially treated soil
Consolidation stress (kPa)	40	60	20	150	100	100	200	200	200	Unconfined
V_{sTD}	36.6	54.0	30.4	119	80.3	203	302	321	301	324
V_{sCC}	33.9	50.8	29.5	119	77.2	175	235	314	296	242
V_{ph}^a	30.0	48.9	25.3	119	57.1	202	218	296	285	—
V_{gr}^b	31.5	48.0	24.7	113	63.7	189	197	288	291	264
Discrepancy between V_{ph} and V_{gr}	4.9%	1.9%	2.5%	5.2%	10.9%	6.6%	10.1%	2.7%	2.9%	—

^a V_{ph} is estimated at the upper frequency limit.

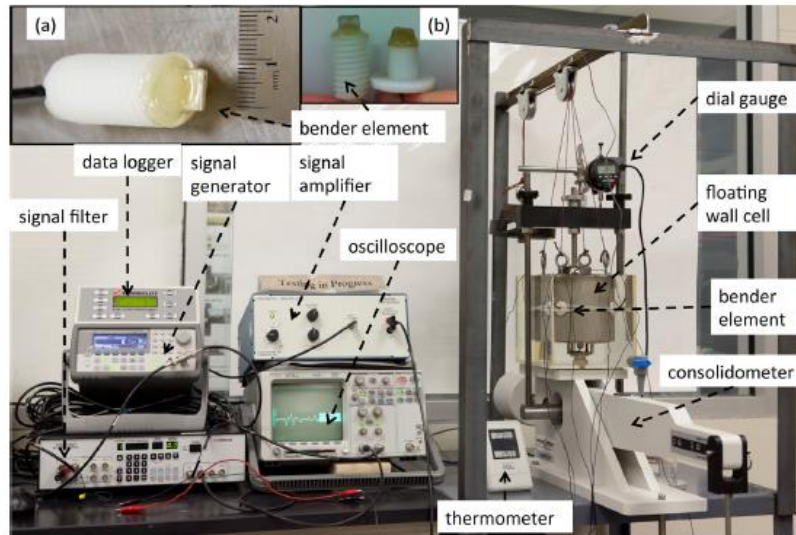
^b V_{gr} is estimated by the best fit of the whole range below the upper frequency limit.

[23]

En 2014, X. Kang, G.-C. Kang, and B. Bate, escriben “*Measurement of Stiffness Anisotropy in Kaolinite Using Bender Element Tests in A Floating Wall Consolidometer*” [24]. En su artículo muestran los resultados de velocidades de onda medidos sobre una muestra de caolinita dentro de una celda flotante. La caolinita ensayada presenta una concentración de 0.005 mol/l de NaCl. Los elementos Bender se colocaron de manera horizontal y vertical, simultáneamente, tal y como se muestra en la Figura 18.

Figura 18. Consolidómetro con pared flotante – sistema de ensayo de Bender Element.

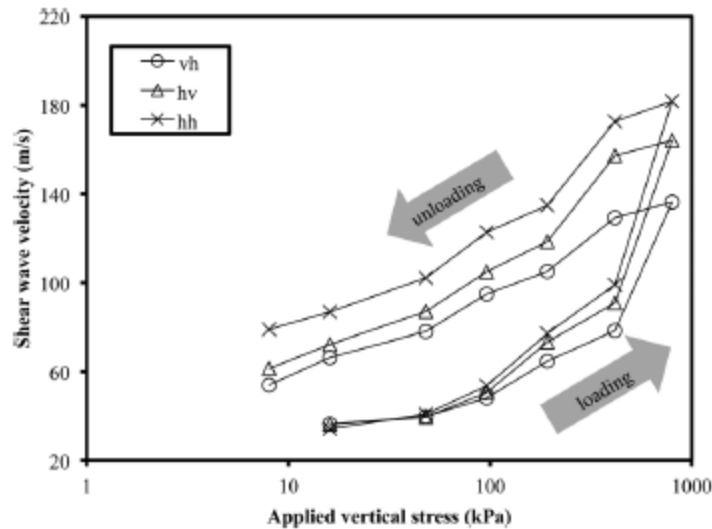
a) Un elemento vertical de Bender Element recién hecho b) Elemento Bender Element vertical y horizontal después de cinco ensayos



[24]

El equipo utilizado es una adaptación de una celda de consolidación a la cual se le incorporaron los elementos Bender. Los valores de velocidad de onda cortante obtenidos para la caolinita por medio del ensayo Bender Element, son menores a los encontrados en la literatura; estos indican que la velocidad de onda cortante, V_s , incrementa con el esfuerzo, la densidad y la concentración. En la figura 19 se observa la variación de V_s , para diferentes valores de esfuerzo vertical aplicado, en condición de carga y descarga.

Figura 19. Velocidades de onda típicas vs esfuerzo vertical aplicado en muestras de caolinita. (Las muestras de caolinita presentan 0.005 mol/L de NaCl)

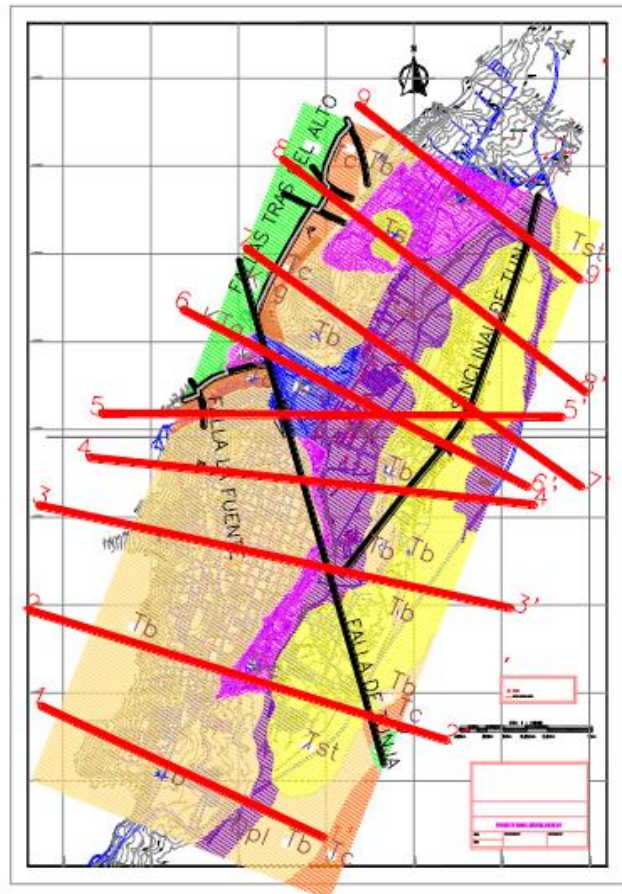


[24]

2.2.2 Caracterización Dinámica de la ciudad de Tunja

E. Rodríguez, M. Sánchez, and C. Sainea, plantean una “*Metodología para la respuesta dinámica del subsuelo en la microzonificación sísmica de la ciudad de Tunja*” [25], en donde describen aspectos generales de la geología, tectónica, sismicidad y geotecnia del área del proyecto, así como los estudios previos orientados hacia una evaluación previa de la respuesta dinámica. En su artículo recomiendan 9 secciones de estudio, localizadas de manera transversal al eje del sinclinal y que abarcan toda la zona urbanística (ver Figura 20); el objetivo de estas secciones es generar un perfil característico en cada una de ellas, con sus correspondientes parámetros geotécnicos y dinámicos que permitan construir modelos en 2D y de esta manera lograr obtener una respuesta dinámica de la ciudad.

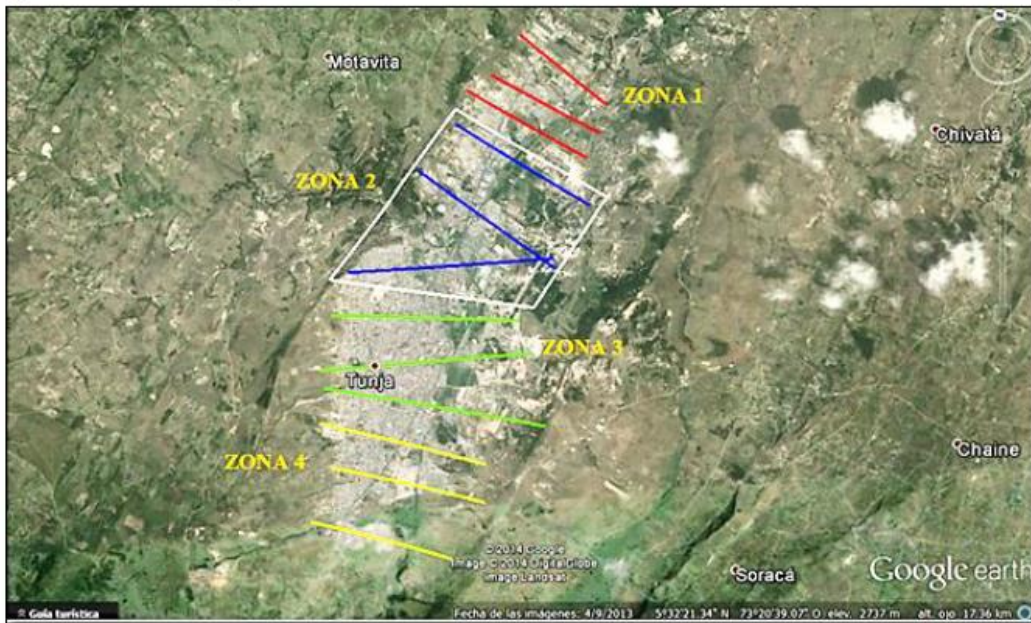
Figura 20. Localización de las secciones recomendadas



[25]

Gómez, C., Tovar, C. (2014) [26] desarrollan un prototipo de Sistemas de Información Geográfica empleando el Software ArcGIS para el análisis, organización y presentación de la información de la microzonificación de la ciudad de Tunja. Para la generación del prototipo realizaron una amplia consulta sobre toda la información disponible de estudios de suelos realizados en la ciudad de Tunja. La zona de estudio corresponde a la zona 2 (Ver Figura 21), planteado en el proyecto de Microzonificación Sísmica de la ciudad de Tunja. Como resultado de la investigación presentan mapas temáticos que muestran la variación de: limite líquido, limite plástico, índice de plasticidad, índice de liquidez, contenido de agua, cohesión, peso unitario y relación de vacíos.

Figura 21. Zona de Estudio



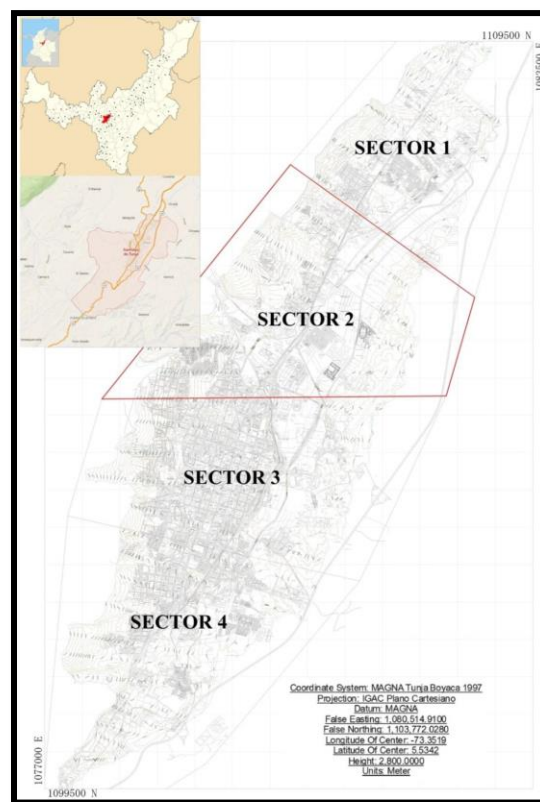
[25]

L. Guío, F. Reyes, M. Sánchez, y O. Jiménez escriben en el 2015, “*Proyecto de Caracterización Dinámica del subsuelo para la Microzonificación Sísmica de la ciudad de Tunja*” [27]. En su investigación realizan una caracterización geodinámica para el avance de la microzonificación sísmica de la ciudad de Tunja, con información geológica y geotécnica, elaborada a partir de 366 estudios de suelos particulares como reconocimiento detallado en campo. También realizaron un programa de exploración, junto con ensayos de laboratorio y campo sobre puntos estratégicos de la ciudad. Como resultados del estudio presentan un perfil promedio con los materiales encontrados en el subsuelo, perfiles de Vs y Vp con respecto a la profundidad obtenidos a partir de ensayos Down hole y líneas geofísicas y variación de las correlaciones de Vs en función del N, del ensayo de SPT.

En el 2014 Orozco, R. y Jiménez, O. también escriben “*Proyecto de Caracterización Dinámica del subsuelo para la Microzonificación Sísmica de la ciudad de Tunja*” [28], en su artículo describen la metodología a desarrollar para generar la microzonificación sísmica de la ciudad de Tunja, de igual manera muestran la información de los ensayos dinámicos de campo a utilizarse para determinar las propiedades dinámicas de los materiales y los criterios que se tuvieron en cuenta para el diseño de la exploración y la planificación de los ensayos.

En el 2016, Sánchez, M. realiza una tesis de grado de maestría titulada “*Estudio de respuesta dinámica del subsuelo en la ciudad de Tunja – Sector Norte*” [29]. En su investigación realiza la caracterización geotécnica y dinámica para las secciones de estudio planteadas para el sector norte, en donde se realizaron ensayos de campo como Down Hole y Cono dinámico, el juego de ensayos dinámicos para obtener la curva característica de los materiales encontrados (Bender Element, columna resonante y triaxial) y los ensayos para la determinación de las propiedades básicas y clasificación del suelo. Como resultado final de la interpretación y la integración de todos los resultados el autor presenta la definición de 12 zonas de respuesta dinámica (ZRD) para el área de estudio las cuales pueden ser integradas en la definición de las zonas homogéneas que resulten de los estudio de respuesta dinámica que se realicen en las demás áreas de la ciudad para completar el proyecto de microzonificación sísmica.

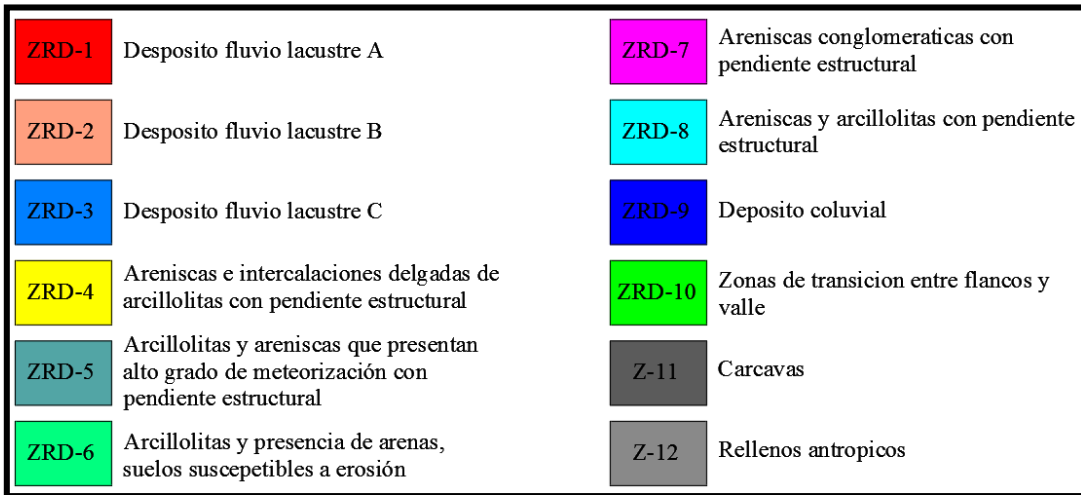
Figura 22. Zona de estudio de la tesis “Estudio de respuesta dinámica del subsuelo en la ciudad de Tunja – Sector Norte”



[29]

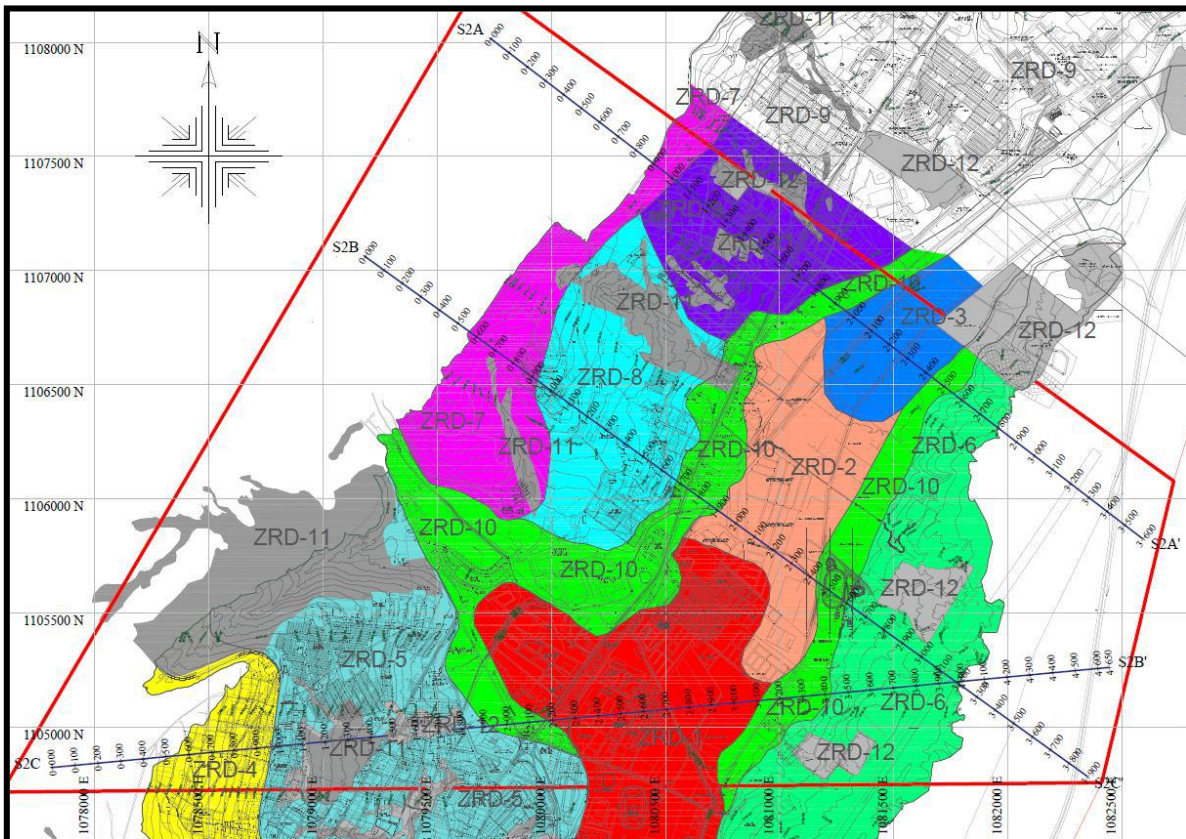
Los resultados de las velocidades de onda V_s , obtenidas en esta tesis por medio del ensayo Bender Element, se tuvieron en cuenta para desarrollar la zonificación dinámica planteada en esta investigación.

Figura 23. Zonificación de la respuesta dinámica de la ciudad de Tunja- sector norte



[29]

Figura 24. Zonas de Respuesta Dinámica identificadas en el área de estudio.



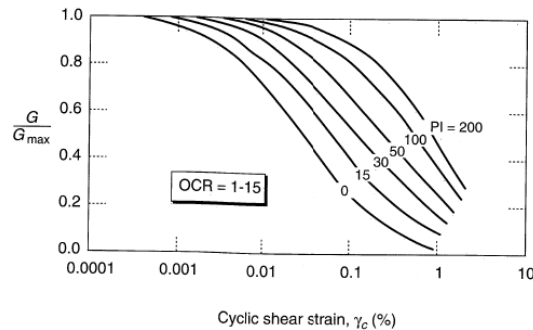
[29]

2.2.3 Variación de las propiedades dinámicas del suelo en función de sus propiedades físicas.

En los primeros años de la ingeniería sísmica geotécnica, el comportamiento del módulo de reducción de suelos de grano grueso y fino, fueron tratados separadamente. [12]. Sin embargo, investigaciones recientes han revelado una transición gradual del módulo de reducción en el comportamiento de suelos no plásticos de grano grueso y suelos plásticos de grano fino. [13].

El módulo de reducción (G/G_{max}) corresponde a una normalización que se hace para el módulo de cortante máximo (G_{max}) y que facilita las interpretaciones, razón por la cual toma valores de 0 a 1. En la Figura 25 se muestra la variación del módulo de reducción en función de la deformación de corte cíclica, para un rango de la relación de sobreconsolidación de 1 a 15 y para diferentes valores de Índice de Plasticidad.

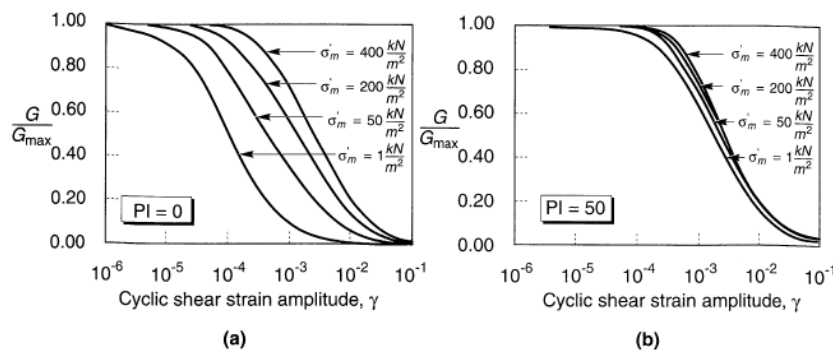
Figura 25. Curvas del módulo de reducción para suelos de grano fino de diferentes plasticidades



[10]

La figura 26 muestra la variación del módulo de reducción del suelo en función de la amplitud de la deformación cortante cíclica para diferentes presiones de confinamiento. La Figura 26. a) para suelos con IP=0 y la b) para IP=50.

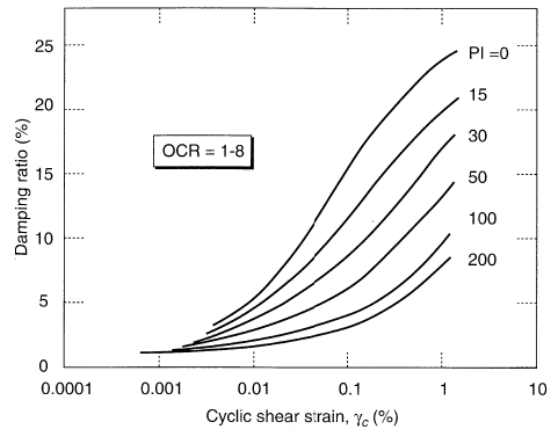
Figura 26. Influencia la presión de confinamiento media efectiva en las curvas del módulo de reducción para a) suelos no plásticos (IP = 0), y b) Suelos plásticos (IP =50).



[10]

Las figuras 25, 26 y 27 corresponden a curvas características de la variación de las propiedades dinámicas en función del índice de plasticidad, la presión de confinamiento efectiva y el grado de sobreconsolidación. Estas curvas son teóricas, sin embargo para estudios de respuesta de sitio es necesario construir la curva para cada uno de los materiales que allí se encuentren.

Figura 27. Variación del coeficiente de amortiguamiento para suelos de grano fino con amplitud de deformación cortante cíclica y plasticidad.



[10]

3. METODOLOGÍA

3.1 DEFINICIÓN DE HIPÓTESIS Y VARIABLES

Como hipótesis del presente proyecto, se tiene que en la zona del depósito fluviolacustre de la ciudad de Tunja, las propiedades dinámicas de los suelos que allí se encuentran no son constantes, sino que por el contrario presentan una variación a lo largo de todo el depósito a causa de su heterogeneidad, espesor, y propiedades índice de los materiales que allí se encuentran. Por esta razón se plantea determinar las propiedades dinámicas de los materiales que conforman el depósito fluviolacustre de la ciudad de Tunja por medio de ensayos Bender Element, con el fin de poder observar cómo se presenta la variación de las propiedades dinámicas del suelo y de qué manera se ven influenciadas por sus propiedades índice. Lo anterior con el fin de identificar algunas zonas que sean susceptibles a presentar mayor amplificación de ondas sísmicas o efectos de sitio.

Dentro del desarrollo del proyecto intervienen diferentes variables, unas independientes y otras dependientes tal y como se indica a continuación:

Variables Independientes: propiedades índice del suelo.

- Humedad
- Límites de Atterberg
- Peso específico
- Granulometría
- Relación de vacíos

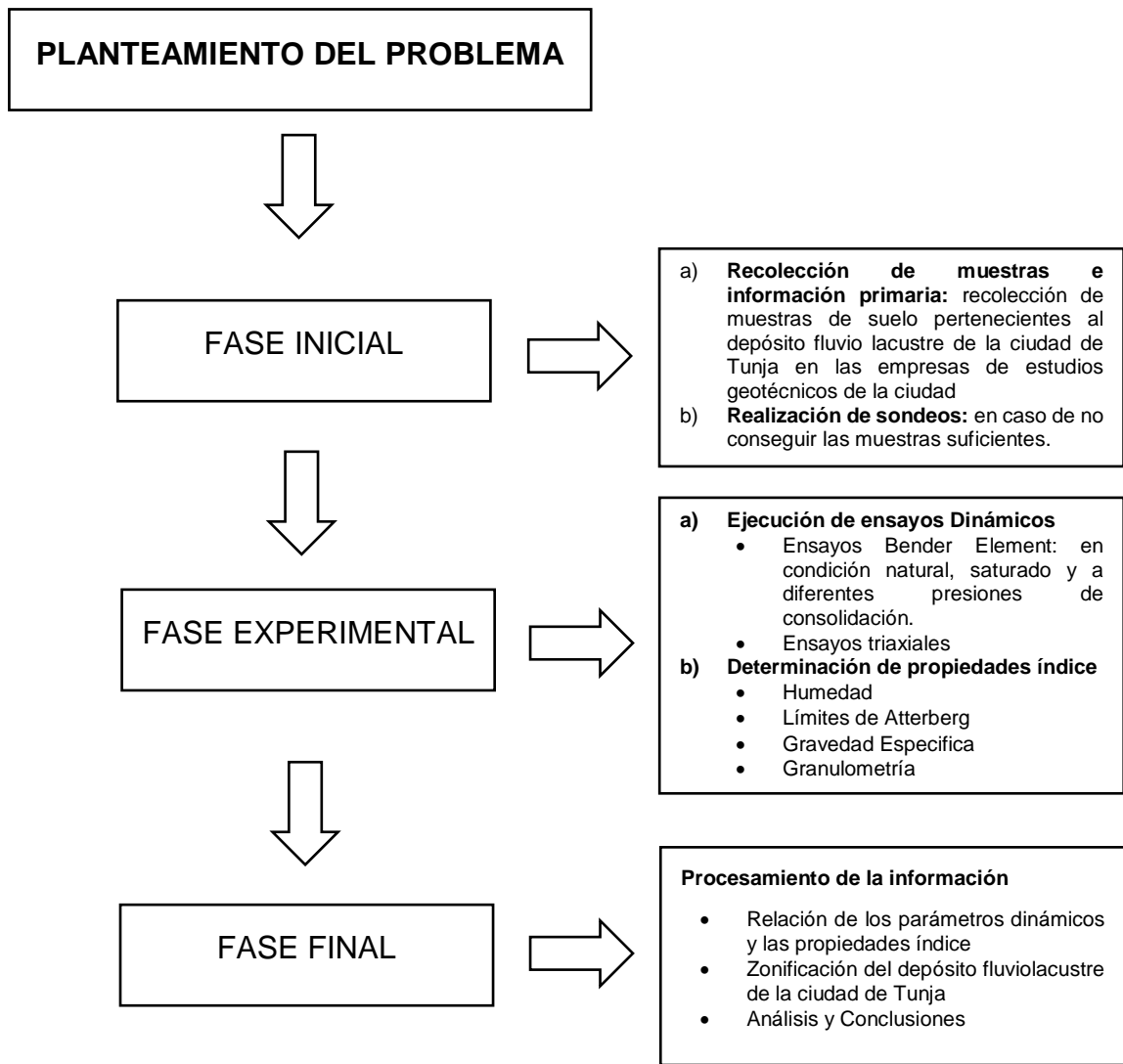
Variables Dependientes: conformadas por aquellas que determinan el comportamiento del suelo al ser atravesado por una onda sísmica (respuesta del suelo), estas a su vez dependerán de sus propiedades índice.

- Velocidad de onda cortante
- Velocidad de onda compresiva
- Módulo de rigidez
- Relación de Poisson
- Módulo de Elasticidad
- Curvas de variación de las propiedades dinámicas en función de las propiedades índice.

3.2 METODOLOGÍA DESARROLLADA

La presente investigación es de tipo correlacional, donde se empleó una metodología de tipo cuantitativa, evaluando las propiedades dinámicas del suelo para describir su comportamiento ante la aplicación de ondas sísmicas, empleando ensayos de laboratorio. Las diferentes etapas desarrolladas se agrupan en tres fases, tal y como se muestra a continuación:

Figura 28. Metodología desarrollada



Autor

3.2.1 Fase inicial

La fase inicial comprende las actividades desarrolladas previas a la ejecución de los ensayos de laboratorio y se compone de dos etapas como se indica a continuación:

3.2.1.1 Recolección de muestras de suelo e información primaria. Como etapa inicial en el desarrollo de esta investigación se hizo una solicitud de muestras alteradas e inalteradas tomadas del depósito fluvio-lacustre de la ciudad de Tunja en las empresas locales de estudios geotécnicos; en el momento de realizar la solicitud, estas empresas no contaban con muestras que se pudieran facilitar para el desarrollo de la investigación, por esta razón se planteó una exploración geotécnica la cual se desarrolló en dos lotes ubicados en el sector norte del depósito. La localización de los dos sitios estuvo determinada por la disponibilidad y acceso que se presentó a los mismos. De igual forma estaban localizados en una zona del depósito con poca información disponible sobre parámetros dinámicos y estáticos.

Al mismo tiempo que se realizó el proceso de recolección de muestras de suelo, también se inició con la recopilación de información primaria, conformada por investigaciones realizadas sobre los suelos presentes en el depósito fluvio-lacustre de la ciudad de Tunja en donde se involucrará su caracterización estática y dinámica. Los estudios encontrados se resumen en el estado de arte de la presente investigación.

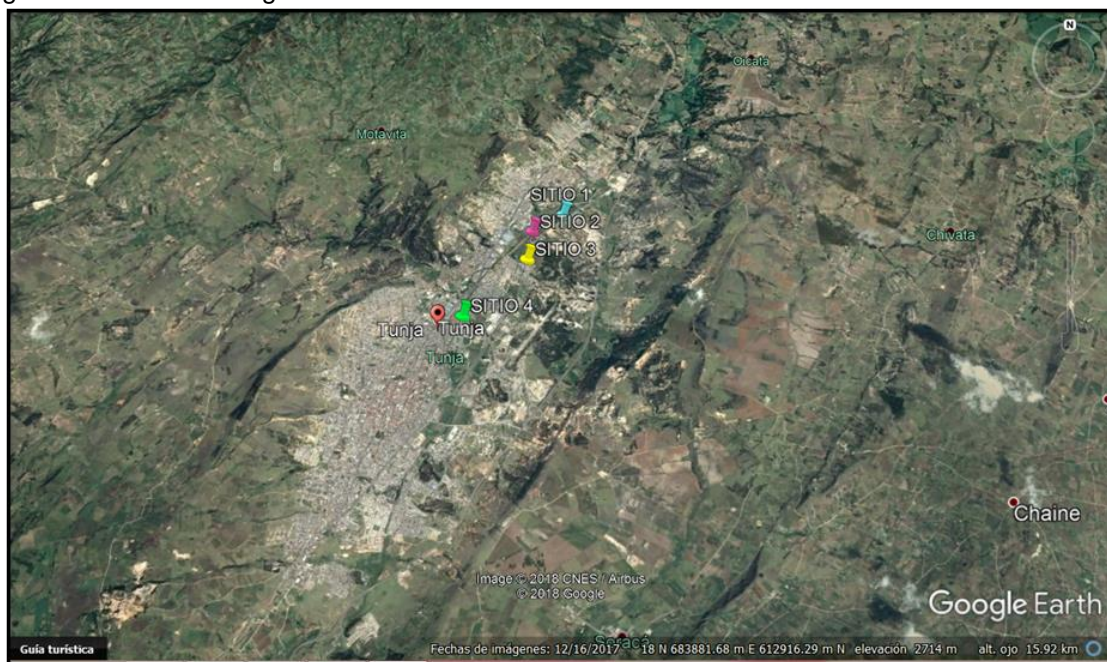
Para la ejecución de los ensayos se requieren muestras inalteradas, las cuales se tomaron teniendo en cuenta la norma I.N.V. E- 105

Finalizando el proceso de ejecución de ensayos Bender Element, se consiguieron tres muestras de otros dos puntos localizados dentro del depósito. Estas fueron suministradas por las empresas: López Hermanos LTDA. y Civilterra S.A.S

3.2.1.2 Realización de Sondeos. Teniendo en cuenta la zonificación y caracterización dinámica ya existente para la ciudad y el depósito, se seleccionaron dos lotes en donde se contaba con el permiso para ingresar y perforar, y allí se realizaron siete sondeos a una profundidad hasta de 9 m. Ver figura 29.

En el sitio 1- Hayuelos, se realizaron dos sondeos y en el sitio 2- Bomberos, 5 sondeos. Ver figura 30.

Figura 29. Localización general sitios de muestreo



Google Earth

Tabla 10. Localización sitios

Sitio	Coordenadas		Descripción
	Norte	Este	
1	1.106.787	1.081.690	Hayuelos
2	1.106.427	1.081.201	Bomberos
3	1.105.912	1.081.108	Las Quintas
4	1.104.846	1.080.114	Coliseo

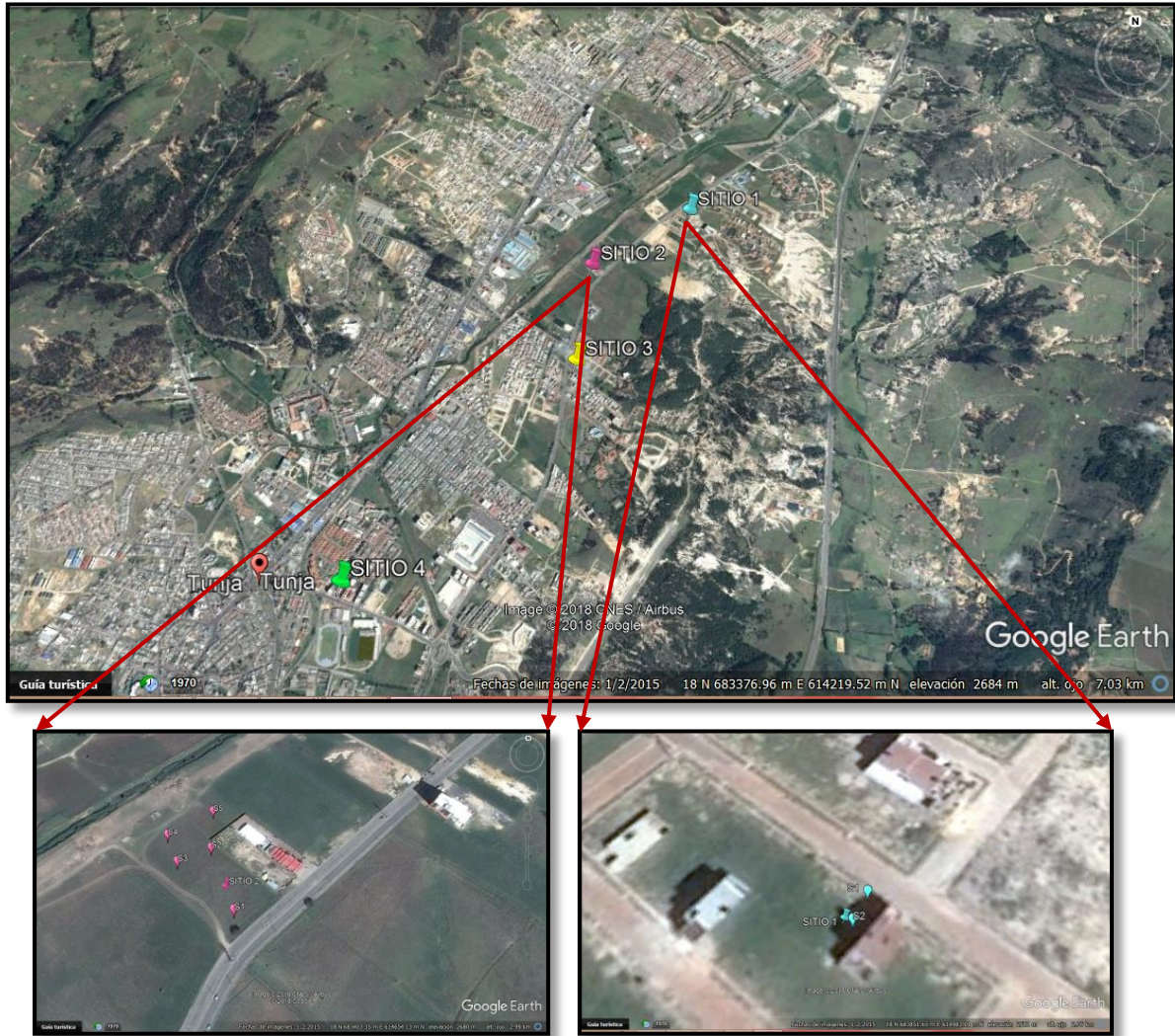
Autor

Tabla 11. Localización sondeos Sitio 1 – Hayuelos

Sitio 1	Coordenadas		Profundidad (m)
	Norte	Este	
Sondeo 1	1.106.787	1.081.690	6,5
Sondeo 2	1.106.781	1.081.687	4,5

Autor

Figura 30. Localización detallada sondeos



Google Earth

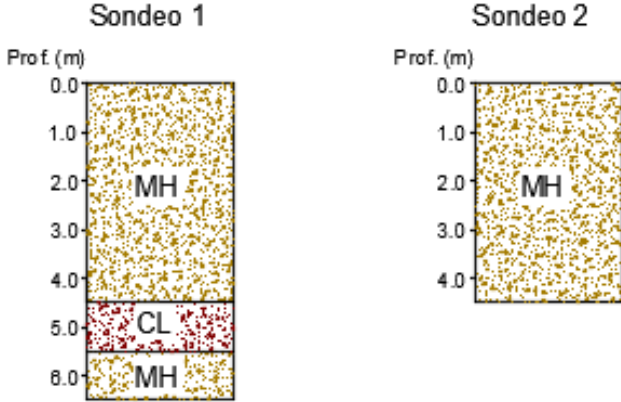
Tabla 12. Localización sondeos Sitio 2 - Bomberos

Sitio	Coordenadas		Profundidad (m)
	Norte	Este	
1	1.106.427	1.081.201	6,0
2	1.106.479	1.081.170	9,5
3	1.106.468	1.081.137	6,0
4	1.106.510	1.081.115	5,5
5	1.106.527	1.081.152	6,5

Autor

En la Figura 31 se presenta un perfil estratigráfico aproximado de los dos sondeos realizados en el sitio 1 – Hayuelos. En estos dos sondeos no se encuentra nivel freático.

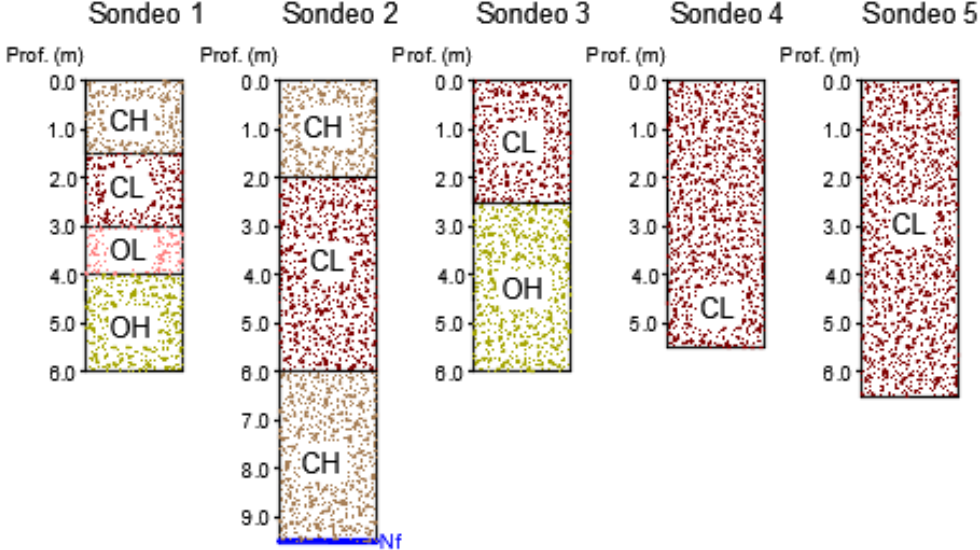
Figura 31. Perfil estratigráfico Sondeo 1 y 2 – Sitio 1 (Hayuelos)



Autor

En la figura 32 se muestran los perfiles estratigráficos aproximados para los cinco sondeos localizados en el Sitio 2 – Bomberos. Únicamente en el Sondeo 2 se encontró nivel freático a una profundidad de 9,5 m.

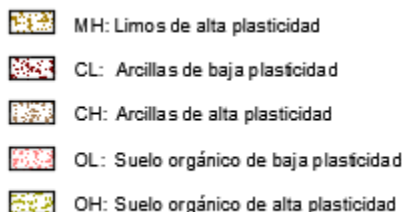
Figura 32. Perfil estratigráfico Sondeo 1, 2, 3, 4 y 5 – Sitio 2 (Bomberos)



Autor

En la figura 33 se Indica la leyenda para los perfiles mostrados anteriormente junto con la descripción de cada material. Los perfiles se construyeron a partir de la clasificación USCS obtenida con los ensayos de Límites de Atterberg realizados en las muestras empleadas para esta investigación.

Figura 33. Leyenda perfiles estratigráficos



Autor

Para el sitio 3 sólo se conoce la localización del mismo, ya que las muestras que de allí se obtuvieron fueron suministradas por la empresa Civilterra S.A.S. Por medio de la identificación visual se observó que correspondían a arcillas de baja plasticidad, y estas se encontraban con un contenido de humedad alto, lo cual permite intuir que se encontraban cerca al nivel freático.

En la Figura 34 se muestra imagen de la perforación mecánica realizada por la empresa López Hermanos LTDA. de donde se obtuvieron 3 muestras para el desarrollo de esta investigación.

Figura 34. Perforación mecánica frente al Coliseo – Sitio 4



Autor

De las muestras suministradas por esta empresa, solo dos se pudieron ensayar, ya que una tercera muestra presentaba un contenido alto de arenas y esto no permitió que se pudieran abrir los huevos para introducir los elementos Bender.

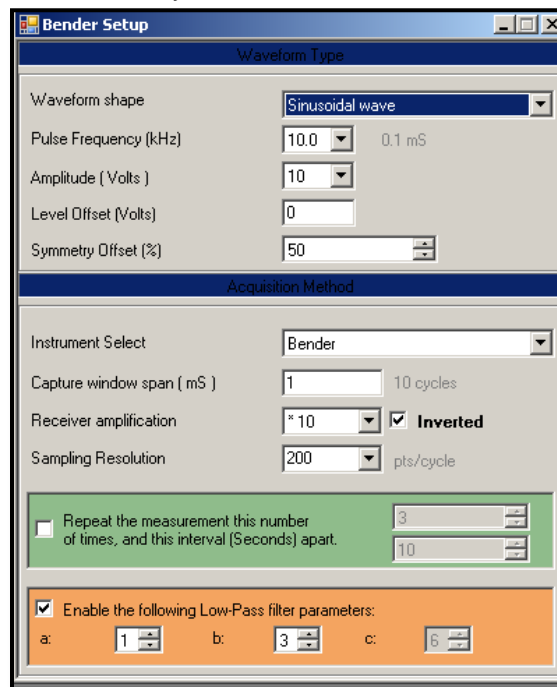
3.2.2 Fase experimental

3.2.2.1 Ejecución de ensayos Dinámicos. Para 32 muestras de las que se consiguieron en el proceso de recolección y perforación, se realizaron ensayos Bender Element por medio de los cuales se determinó la velocidad de onda cortante del suelo (V_s) y la velocidad de onda compresiva (V_p).

Para el ensayo # 5 no fue posible realizar la medición de las velocidades ya que la muestra se dañó después de hacer el montaje y antes de hacer la primera medición de las velocidades de onda en condición natural.

Para la realización de los ensayos Bender Element se necesitaban como datos de entrada la distancia entre los elementos Bender y el peso unitario. Además se debía ingresar la configuración del impulso que se iba a generar en la muestra para la medición de las velocidades, entre los parámetros a ingresar se tienen: tipo de onda a generar, frecuencia, amplitud, resolución y parámetros de filtro. En la figura 35 se muestran los valores de entrada empleados para los ensayos.

Figura 35. Parámetros de entrada ensayo Bender Element



Autor

En la investigación se propuso realizar el ensayo Bender Element en condición natural, saturada y para tres valores diferentes de presión de consolidación (modificación de la relación de vacíos), sin embargo en algunos ensayos no fue posible desarrollar todas las condiciones planteadas ya que durante su ejecución se presentaban inconvenientes como: caída de la luz, pérdida de presión y, ensanchamiento de la membrana y daño de la muestra.

Figura 36. Muestra dañada durante el ensayo Bender Element



Autor

En tres de las muestras obtenidas para esta investigación se realizaron ensayos Triaxiales Dinámicos.

Los ensayos dinámicos se realizaron en el Laboratorio de Suelos de la UPTC empleando el Equipo Triaxial con la opción de Bender Element. Este equipo se adquirió en el 2016. En el momento de la instalación el proveedor lo dejó calibrado y listo para su funcionamiento.

El procedimiento de ejecución del ensayo Bender Element se realizó de acuerdo con la norma ASTM D 2845-08 y el manual de funcionamiento del equipo.

El ensayo triaxial Dinámico se hizo en condición consolidado no drenado teniendo en cuenta como referencia la norma ASTM D5311/D5311M.

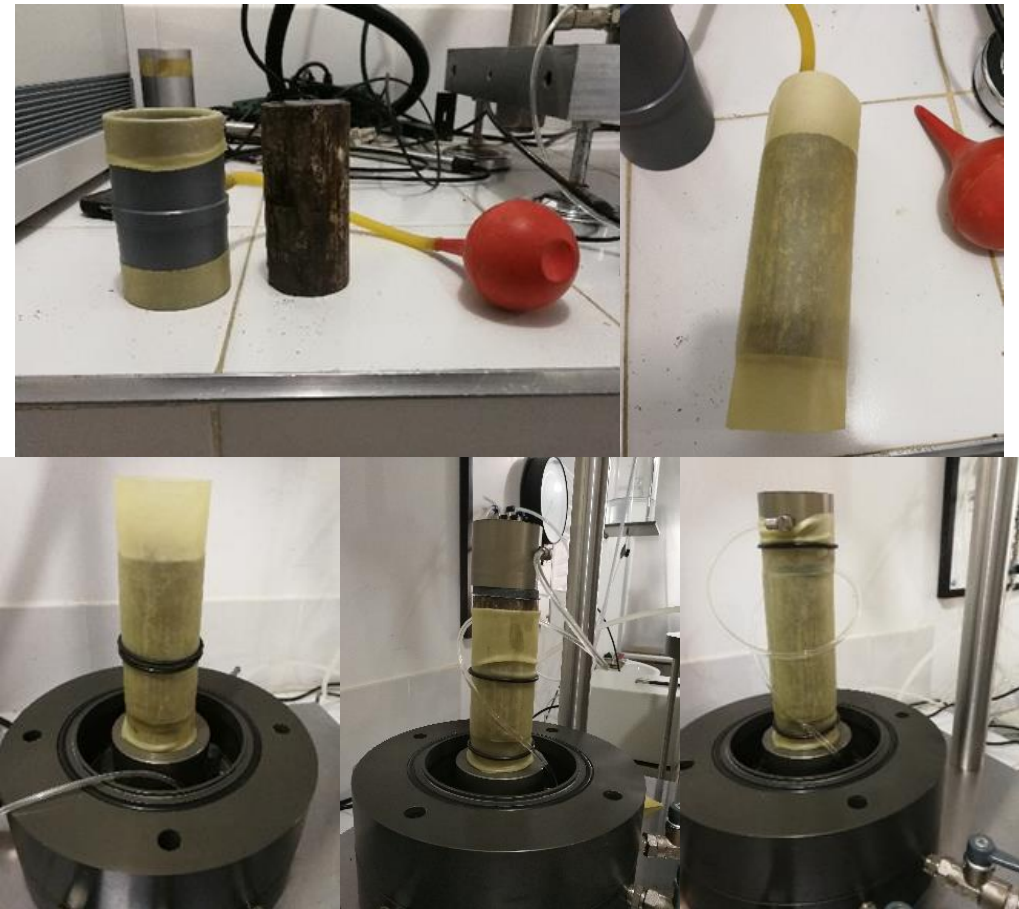
El montaje de la muestra de suelo para el ensayo Bender Element y para el ensayo triaxial es similar. Inicialmente se perfila la muestra manteniendo una relación h/d aproximadamente de 2, se toman las dimensiones y el peso para calcular el peso específico de la muestra. La diferencia en estos radica en que el ensayo Bender Element se deben abrir dos orificios, uno en cada extremo para poder introducir los elementos Bender, garantizando que el tamaño sea el adecuado y que estos queden totalmente alineados.

El procedimiento general para la ejecución del ensayo Bender Element consiste en medir el tiempo de propagación en que un impulso generado en uno de los extremos la muestra, llega hasta el otro extremo (luego se tendrán dos elementos Bender, uno en la parte inferior del espécimen y otro en la parte superior). La dirección en la que viaja la onda puede ser de arriba – abajo o abajo – arriba, dependiendo del tipo de onda que se esté midiendo. Con la altura de la muestra, y el tiempo de propagación del impulso se procederá a determinar la velocidad de propagación de onda cortante (V_s) y de onda compresiva (V_p). A partir de estas velocidades se calcularán las demás propiedades dinámicas del suelo.

En la Figura 37 se muestra el montaje de la muestra en el equipo triaxial; el procedimiento se resume en los siguientes pasos:

- a) Se prepara la muestra: perfilándola, abriendo los orificios para los elementos Bender, tomando las dimensiones y el peso.
- b) Se coloca la muestra dentro de la membrana
- c) Se ubica la muestra en la cámara triaxial, asegurándola con la membrana y los o-rings.
- d) Se coloca la base superior, teniendo cuidado de que los elementos Bender queden totalmente alineados, se asegura con la membrana y se hace la primera medición de la velocidad.
- e) Posteriormente se coloca la cámara triaxial, se llena y se genera el proceso de saturación de la muestra para medir nuevamente las velocidades, V_s y V_p .
- f) Finalmente se genera el proceso de consolidación y se miden las velocidades. Este último paso se repite dos veces para cumplir las condiciones propuestas.

Figura 37. Montaje ensayo Bender Element



Autor

3.2.2.2 Determinación Propiedades Índice. Terminados los ensayos dinámicos se procedió a la realización de los ensayos para clasificar las muestras de suelo empleadas. Estos ensayos se hicieron en el Laboratorio de Suelos de la UPTC, teniendo en cuenta la norma de referencia que especifica su procedimiento de ejecución y el procesamiento de los datos tomados para determinar los resultados esperados. A continuación se enuncian los ensayos realizados para la determinación de las propiedades índice del suelo:

- Humedad: I.N.V. E- 122 - 2013
- Límite Líquido: I.N.V. E- 125 - 2013
- Límite Plástico: I.N.V. E- 126 – 2013
- Límite de Contracción: I.N.V. E- 127 – 2013
- Gravedad específica: I.N.V. E- 128 - 2013
- Granulometría para suelos finos: Hidrómetro (I.N.V. E- 124 – 2013) y Lavado sobre tamiz 200 I.N.V. E- 214 – 2013.
- Contenido de materia orgánica I.N.V. E- 121 – 2013

Los ensayos de humedad, límites de Atterberg y gravedad específica se realizaron en todas las muestras. El ensayo de hidrómetro se realizó solo en algunas muestras debido a la disponibilidad del equipo y a contar con la suficiente muestra para ser ensayada; los lavados sobre tamiz 200 se hicieron en pocas muestras debido a que no se contaba con suficiente material.

Las muestras recolectadas se cubrieron con parafina y vinipel, y se almacenaron en el laboratorio de Suelos de la UPTC en un sitio donde la temperatura no presentara cambios representativos, con el fin de poder mantener el contenido de humedad natural.

Al preparar las muestras para el ensayo Bender Element, algunas presentaban hongos, por esta razón se decidió realizarles el ensayo de contenido de materia orgánica.

Figura 38. Ensayo de límites de Atterberg



Autor

Figura 39. Ensayo de Gravedad Específica



Fuente Autor

Figura 40. Contenido de Materia orgánica



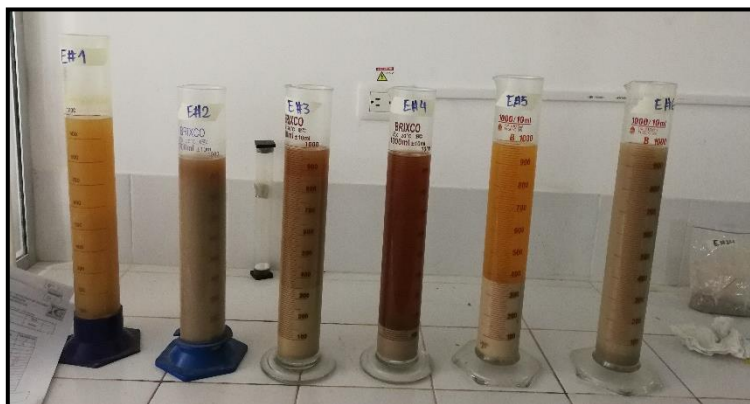
Autor

Figura 41. Ensayo Hidrómetro



Autor

Figura 42. Ensayo Hidrómetro



Autor

3.2.3 Fase final (procesamiento de la información y análisis)

Determinación de los parámetros dinámicos: con los resultados obtenidos de V_s , se procede a calcular los demás parámetros dinámicos del suelo empleando expresiones matemáticas para tal fin.

3.2.3.1 Relación parámetros dinámicos y propiedades índice: se determinarán correlaciones y/o curvas que representen la variación de los parámetros dinámicos del suelo con respecto a sus propiedades índice y la influencia del contenido de agua y la relación de vacíos en la velocidad de onda cortante.

3.2.3.2 Procesamiento de la información: con la información obtenida por medio de los ensayos de laboratorio y la caracterización dinámica y geotécnica ya existente, se localizarán geográficamente cada una de las muestras con sus respectivos parámetros geotécnicos y dinámicos, para finalmente identificar zonas de comportamiento homogéneo que con lleven a la zonificación dinámica del depósito fluviolacustre de la ciudad de Tunja

3.2.3.3 Resultados y conclusiones: como resultado de esta investigación se espera obtener:

- a) El análisis, verificación y planteamiento de la variación de las velocidades de onda cortante (V_s) y compresiva (V_p) de los materiales presentes en el depósito fluviolacustre de la ciudad de Tunja, obtenidas mediante al ensayo Bender Element, con respecto a correlaciones y/o curvas ya formuladas y en función de las propiedades físicas del suelo.
- b) Un mapa de zonificación dinámica de acuerdo con los valores de velocidades de onda obtenidos por medio del ensayo de Bender Element para los materiales presentes en el depósito, que permita complementar la zonificación y caracterización dinámica ya existente para la ciudad de Tunja.

- c) Establecer la caracterización dinámica del depósito fluvio lacustre de la ciudad de Tunja a partir de los resultados obtenidos con el ensayo de Bender Element, triaxial dinámico y otras investigaciones desarrolladas para la zona de estudio.

4. RESULTADOS

Para el desarrollo de la presente investigación se hicieron dos tipos de ensayos dinámicos, el ensayo Bender Element y el ensayo Triaxial; así como ensayos para la determinación de las propiedades básicas como lo son: humedad, límites, gravedad específica, lavados e hidrómetro. Estos ensayos se realizaron en el laboratorio de suelos de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, haciendo uso de los equipos que allí se encontraban.

4.1 ENSAYOS BENDER ELEMENT

Los ensayos Bender Element se ejecutaron en 32 muestras tomadas del depósito fluviolacustre de la ciudad de Tunja en diferentes sitios y a varias profundidades. En la Figura 30 se muestra la localización de los sitios en los cuales se realizaron los sondeos y en la Tabla 14 las coordenadas y la profundidad de cada muestra empleada en los ensayos Bender Element.

Tabla 13. Localización muestras ensayadas con Bender Element

Ensayo	Sitio	Sondeo	Muestra	Prof. (m)	Coordenadas	
					Norte	Este
1	Hayuelos	2	5	3,0 a 3,5	1.106.781	1.081.687
2	Hayuelos	1	7	3,5 a 4,0	1.106.787	1.081.690
3	Hayuelos	2	7	4,0 a 4,5	1.106.781	1.081.687
4	Bomberos	2	3	1,5 a 2,0	1.106.479	1.081.170
5	Bomberos	2	3 V2	1,5 a 2,0	1.106.479	1.081.170
6	Hayuelos	2	6	3,5 a 4,0	1.106.781	1.081.687
7	Hayuelos	2	3	2,0 a 2,5	1.106.781	1.081.687
8	Hayuelos	2	3 V1	2,0 a 2,5	1.106.781	1.081.687
9	Bomberos	2	5	2,5 a 3,0	1.106.479	1.081.170
10	Bomberos	1	8	4,5 a 5,0	1.106.427	1.081.201
11	Bomberos	2	8	4,0 a 4,5	1.106.479	1.081.170
12	Bomberos	2	4	2,0 a 2,5	1.106.479	1.081.170
13	Hayuelos	1	11	6,0 a 6,5	1.106.787	1.081.690
14	Bomberos	1	7	3,5 a 4,0	1.106.427	1.081.201
15	Bomberos	1	2	1,0 a 1,5	1.106.427	1.081.201
16	Bomberos	5	5	2,5 a 3,0	1.106.527	1.081.152
17	Bomberos	3	4	2,5 a 3,0	1.106.468	1.081.137
18	Bomberos	1	8 V2	4,5 a 5,0	1.106.427	1.081.201
19	Bomberos	3	3	2,0 a 2,5	1.106.468	1.081.137
20	Bomberos	2	4 V2	2,0 a 2,5	1.106.479	1.081.170
21	Bomberos	2	18	9,0 a 9,5	1.106.479	1.081.170

22	Bomberos	4	9	5,0 a 5,5	1.106.510	1.081.115
23	Hayuelos	1	10	5,0 a 5,5	1.106.787	1.081.690
24	Bomberos	2	12	6,0 a 6,5	1.106.479	1.081.170
25	Bomberos	5	9	5,0 a 5,5	1.106.527	1.081.152
26	Bomberos	1	3	1,5 a 2,0	1.106.427	1.081.201
27	Bomberos	1	4	2,0 a 2,5	1.106.427	1.081.201
28	Bomberos	2	11	5,5 a 6,0	1.106.479	1.081.170
29	Coliseo	1	1	2,70 a 3,0	1.106.781	1.081.687
30	Coliseo	1	2	10,0 a 10,3	1.106.781	1.081.687
31	Bomberos	3	6	3,5 a 4,0	1.106.468	1.081.137
32	Las Quintas	1	2	2,8 a 3,2	1.105.912	1.081.108

Autor

Los ensayos se plantearon para cada una de las muestras en cinco condiciones diferentes: natural, saturada y tres valores diferentes de relación de vacíos. En algunos ensayos no se pudo medir la velocidad en todas las condiciones propuestas debido a problemas como: fallas en el servicio eléctrico, caída de la presión en el proceso de saturación o consolidación, daño en la muestra durante la saturación y embobamiento de la membrana.

En la Tabla 15 se presenta el listado de los ensayos realizados para cada muestra en las diferentes condiciones propuestas y en el caso de las consolidaciones se indica la presión de confinamiento a la cual se realizaron cada una de estas etapas.

Tabla 14. Listado de ensayos Bender Element realizados en cada condición propuesta

Ensayo	Condición natural	Saturada	Consd. 1		Consd. 2		Consd. 3	
			Presión (kPa)	Presión (kPa)	Presión (kPa)	Presión (kPa)	Presión (kPa)	
1	X	-	-	-	-	-	-	-
2	X	X	500	X	650	X	-	-
3	X	X	-	-	-	-	-	-
4	X	X	500	X	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-
6	X	X	500	X	-	-	-	-
7	X	-	-	-	-	-	-	-
8	X	X	300	X	-	-	-	-
9	X	X	500	X	600	X	800	X
10	X	X	-	-	-	-	-	-
11	X	X	250	X	-	-	-	-
12	X	X	-	-	-	-	-	-
13	X	X	200	X	400	X	800	X
14	X	X	200	X	400	X	800	X
15	X	X	200	X	400	X	800	X

16	X	X	200	X	400	X	800	X
17	X	X	200	X	400	X	-	-
18	X	X	200	X	400	X	800	X
19	X	X	200	X	400	X	800	X
20	X	X	200	X	400	X	800	X
21	X	X	200	X	400	X	800	X
22	X	X	200	X	400	X	800	X
23	X	X	200	X	400	X	-	-
24	X	-	-	-	-	-	-	-
25	X	X	-	-	-	-	-	-
26	X	X	200	X	400	X	-	-
27	X	X	200	X	400	X	800	X
28	X	X	-	-	-	-	-	-
29	X	X	200	X	400	X	800	X
30	X	X	200	X	400	X	800	X
31	X	X	-	-	-	-	-	-
32	X	X	200	X	400	X	800	X

X Ensayo Realizado
 - Ensayo NO realizado

Autor

En el Anexo A se presentan los registros de los ensayos realizados para la determinación de las velocidades de onda V_s y V_p , mediante el ensayo Bender Element. En la Tabla 16 se muestra el resumen de los resultados de velocidades de onda obtenidos, tanto V_s como V_p , en cada una de las condiciones ya mencionadas. El ensayo # 5 no está ya que la muestra se dañó en el proceso de medición.

Tabla 15. Resultados Velocidades de Onda Vs y Vp, en Diferentes Condiciones

Ensayo	Vs (m/s)					Vp (m/s)				
	Natural	Saturada	1 Consd.	2 Consd.	3 Consd.	Natural	Saturada	1 Consd.	2 Consd.	3 Consd.
1	1720,016	-	-	-	-	1412,813	-	-	-	-
2	2040,924	219,383	193,673	1542,349	-	1798,69	621,155	445,229	1574,617	-
3	184,861	1736,279	-	-	-	471,261	2028,101	-	-	-
4	214,961	1590,425	255,638	-	-	491,205	1700,268	150,547	-	-
6	224,936	1282,908	2365,128	1180,264	-	247,122	989,3	179,482	1497,71	-
7	1333,522	-	-	-	-	1451,262	-	-	-	-
8	1582,67	268,697	1585,388	-	-	1860,066	972,007	3558,672	-	-
9	257,021	141,704	213,829	193,445	938,573	1880,619	336,106	563,593	295,452	521,211
10	213,511	3279,597	-	-	-	233,035	3122,973	-	-	-
11	374,204	211,459	1493,301	-	-	436,633	1935,177	2033,451	-	-
12	427,981	199,854	-	-	-	532,48	206,757	-	-	-
13	291,903	1094,031	518,839	3340,428	275,37	457,51	1709,712	1490,493	275,37	629,505
14	220,446	2978,17	982,487	3131,761	658,02	136,675	280,668	519,387	322,744	632,065
15	428,554	1080,8	3992,22	421,151	3225,684	434, 215	1898,36	179,393	875,141	387,745
16	3074,065	772,686	243,818	1643,357	1525,059	582,331	3407,009	1012,83	1480,933	5906,466
17	1926,321	2863,12	3259,393	864,992	4094,344	623,8	394,225	3695,988	518,931	342,726
18	225,74	397,219	600,198	1543,338	860,176	269,533	601,778	1001,615	3588,388	1005,175
19	2007,409	2070,784	1833,603	756,764	860,176	3516,117	2420,433	3619,28	915,138	1005,175
20	3205,912	2763,296	1818,138	1613,947	1636,689	315,285	4454,61	2983,965	1733,007	3790,,478
21	1730,43	1844,654	1919,159	2858,476	2638,61	249,883	1854,294	2011,999	1904,041	3883,752
22	2182,228	795,147	519,757	198,801	3562,39	441,039	981,146	761,194	174,479	2338,051
23	434,787	673,731	778,505	522,584	-	424,001	759,473	707,137	322,329	-
24	520,264	-	-	-	-	2692,128	-	-	-	-
25	1681,931	1772,085	-	-	-	1412,813	585,253	-	-	-
26	3354,107	1999,467	3493,326	2268,993	-	2134,431	3086,232	3359,34	3810,138	-
27	455,973	2226,434	3263,99	3518,661	1947,089	242,514	628,912	2055,086	2537,007	2303,108
28	317,202	2315,688	-	-	-	427,556	1681,89	-	-	-
29	1641,605	668,673	739,745	1065,543	773,306	2430,938	1619,589	3380,875	2146,595	3038,093
30	3936,01	985,898	153,365	929,297	728,535	301,891	2994,333	1046,848	604,854	1152,461
31	469,625	2410,1	-	-	-	621,897	1846,539	-	-	-
32	299,022	402,585	405,067	324,959	227,675	199,085	553,815	565,344	624,897	264,58

Autor

4.2 ENSAYOS DE PROPIEDADES BÁSICAS

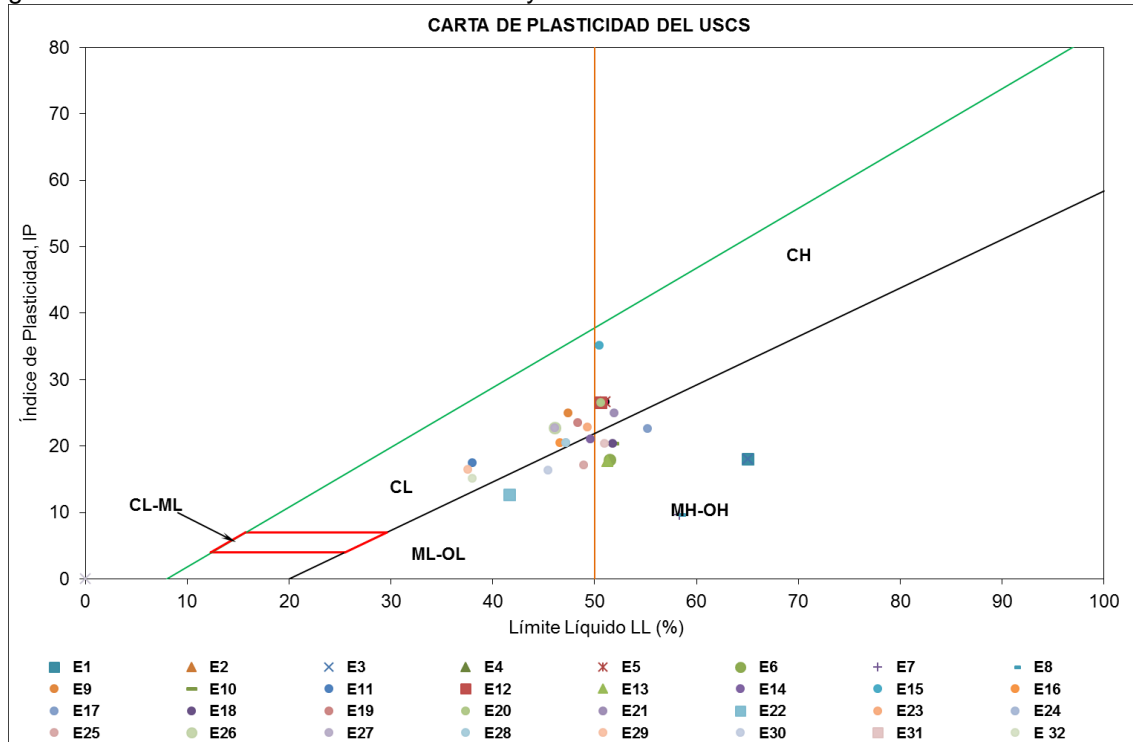
4.2.1 Humedad Natural

Para la determinación de la humedad natural del suelo se emplearon los pesos húmedos de las muestras al momento del ensayo Bender Element y Triaxial, y el peso seco después del ensayo; teniendo en cuenta la norma INV E 122-13. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 18. Para más detalle ver Anexo C.

4.2.2 Límites de Atterberg

Se realizó la determinación de los límites de Atterberg para cada una de las muestras ensayadas, para poder clasificarlas, teniendo en cuenta las normas INV E 125, 126 y 127 de 2013. Los resultados se presentan en la Tabla 18. Ver Anexo C.

Figura 43. Clasificación USCS muestras ensayadas con Bender Element



Autor

Tabla 16. Propiedades básicas de las muestras empleadas en el ensayo Bender Element

# Ensayo Bender	Sitio	Sondeo	Muestra	w (%)	LL (%)	LP (%)	LC (%)	IP (%)	IL	IC	Clasificación USCS
1	Hayuelos	2	5	38,66	64,99	46,94	-	18,05	-0,46	1,46	MH
2	Hayuelos	1	7	47,55	51,23	33,51	-	17,72	-0,06	1,06	MH
3	Hayuelos	2	7	25,20	64,99	46,94	-	18,05	-1,20	2,20	MH
4	Bomberos	2	3	30,63	51,03	24,36	18,32	26,67	0,23	0,77	CH
5	Bomberos	2	3 V2	19,20	51,03	24,36	18,32	26,67	-0,19	1,19	CH
6	Hayuelos	2	6	38,14	51,46	33,51	-	17,95	0,26	0,74	MH
7	Hayuelos	2	3	15,80	58,30	48,63	-	9,67	-3,40	4,40	MH
8	Hayuelos	2	3 V2	14,88	58,30	48,63	-	9,67	-3,49	4,49	MH
9	Bomberos	2	5	24,87	47,41	22,47	18,43	24,94	0,10	0,90	CL
10	Bomberos	1	8	20,78	51,74	31,33	26,50	20,41	-0,52	1,52	OH
11	Bomberos	2	8	16,39	37,98	20,53	18,32	17,46	-0,24	1,24	CL
12	Bomberos	2	4	15,49	50,62	24,04	-	26,58	-0,32	1,32	CH
13	Hayuelos	1	11	19,23	51,23	33,51	-	17,72	-0,81	1,81	MH
14	Bomberos	1	7	40,91	49,60	28,49	23,27	21,11	0,59	0,41	OL
15	Bomberos	1	2	9,67	50,41	15,24	-	35,17	-0,16	1,16	CH
16	Bomberos	5	5	19,70	46,60	26,13	12,87	20,47	-0,31	1,31	CL
17	Bomberos	3	4	20,09	55,17	32,48	-	22,69	-0,55	1,55	OH
18	Bomberos	1	8 V2	45,69	51,74	31,33	26,50	20,41	0,70	0,30	OH
19	Bomberos	3	3	19,93	48,32	24,76	17,44	23,56	-0,20	1,20	CL
20	Bomberos	2	4 V2	25,92	50,62	24,04	-	26,58	0,07	0,93	CH
21	Bomberos	2	18	34,92	51,86	26,86	20,57	25,01	0,32	0,68	CH
22	Bomberos	4	9	31,30	41,65	28,99	-	12,66	0,18	0,82	CL
23	Hayuelos	1	10	24,26	49,26	26,35	24,77	22,92	-0,09	1,09	CL
24	Bomberos	2	12	15,41	47,15	26,66	24,97	20,49	-0,55	1,55	CH
25	Bomberos	5	9	28,62	48,92	31,75	19,84	17,17	-0,18	1,18	CL
26	Bomberos	1	3	20,01	46,08	23,36	22,21	22,72	-0,15	1,15	CL
27	Bomberos	1	4	10,28	46,08	23,36	22,21	22,72	-0,58	1,58	CL
28	Bomberos	2	11	20,34	47,15	26,66	24,97	20,49	-0,31	1,31	CL
29	Coliseo	1	1	30,44	37,55	21,02	17,02	16,53	0,57	0,43	CL
30	Coliseo	1	2	24,19	45,41	28,99	24,41	16,42	-0,29	1,29	ML
31	Bomberos	3	6	22,44	51,00	30,63	30,23	20,37	-0,40	1,40	OH
32	Las Quintas	1	2	37,75	37,97	22,78	-	15,19	0,99	0,01	CL

Autor

Tabla 17. Resultados Gravedad Especifica para las muestras utilizadas en los ensayos Bender Element

# Ensayo Bender	Sitio	Sondeo	Muestra	Temp. Ensayo (°C)	Wm+ agua (g)	Wm+ agua+ solido (g)	Wplátón (g)	Wplaton+ suelo seco (g)	Wsuelo seco (g)	k	GS
1	Hayuelos	2	5	19,00	662,61	701,50	62,30	124,20	61,90	1,00	2,70
2	Hayuelos	1	7	19,00	662,61	700,80	59,60	120,30	60,70	1,00	2,70
3	Hayuelos	2	7	20,00	655,46	713,32	0,00	90,63	90,63	1,00	2,77
4	Bomberos	2	3	19,00	662,61	702,00	64,68	126,68	62,00	1,00	2,75
5	Bomberos	2	3 V2	19,00	662,61	702,00	64,68	126,68	62,00	1,00	2,75
6	Hayuelos	2	6	19,00	662,61	698,90	63,20	121,60	58,40	1,00	2,65
7	Hayuelos	2	3	23,00	660,81	716,42	0,00	87,51	87,51	1,00	2,74
8	Hayuelos	2	3 V2	23,00	660,81	716,42	0,00	87,51	87,51	1,00	2,74
9	Bomberos	2	5	19,00	662,61	700,62	60,48	120,85	60,37	1,00	2,71
10	Bomberos	1	8	19,00	662,61	697,90	73,64	130,50	56,86	1,00	2,64
11	Bomberos	2	8	19,00	662,61	701,14	57,64	119,76	62,12	1,00	2,64
12	Bomberos	2	4	19,00	662,61	700,54	67,48	128,02	60,54	1,00	2,68
13	Hayuelos	1	11	19,00	662,61	700,10	58,70	118,50	59,80	1,00	2,69
14	Bomberos	1	7	19,00	662,61	698,50	58,16	116,33	58,17	1,00	2,62
15	Bomberos	1	2	19,00	662,61	701,95	66,28	128,65	62,37	1,00	2,71
16	Bomberos	5	5	19,00	662,61	701,42	48,83	111,98	63,15	1,00	2,60
17	Bomberos	3	4	19,00	662,61	700,29	43,78	105,12	61,34	1,00	2,60
18	Bomberos	1	8 V2	19,00	662,61	697,90	73,64	130,50	56,86	1,00	2,64
19	Bomberos	3	3	19,00	662,61	700,25	60,76	119,67	58,91	1,00	2,78
20	Bomberos	2	4 V2	19,00	662,61	700,54	67,48	128,02	60,54	1,00	2,68
21	Bomberos	2	18	19,00	662,61	699,91	47,65	107,53	59,88	1,00	2,66
22	Bomberos	4	9	19,00	662,61	701,60	59,40	122,70	63,30	1,00	2,61
23	Hayuelos	1	10	21,70	661,84	701,20	0,00	65,20	65,20	1,00	2,52
24	Bomberos	2	12	21,80	661,82	699,40	0,00	61,09	61,09	1,00	2,59
25	Bomberos	5	9	21,80	661,82	689,70	16,35	61,76	45,41	1,00	2,59
26	Bomberos	1	3	22,00	661,76	697,50	16,34	73,65	57,31	1,00	2,65
27	Bomberos	1	4	22,00	661,76	697,50	16,34	73,65	57,31	1,00	2,65
28	Bomberos	2	11	21,80	661,82	699,40	0,00	61,09	61,09	1,00	2,59
29	Coliseo	1	1	21,00	662,03	696,30	16,35	72,35	56,00	1,00	2,57
30	Coliseo	1	2	21,00	662,03	701,80	16,35	80,80	64,45	1,00	2,61
31	Bomberos	3	6	21,00	662,03	684,60	16,35	52,80	36,45	1,00	2,62
32	Las Quintas	1	2	21,00	662,03	695,70	183,45	238,10	54,65	1,00	2,60

Autor

4.2.3 Gravedad Especifica (Gs)

Teniendo como referencia la profundidad de las muestras, la localización y el cambio de material de cada sondeo, se realizaron ensayos de gravedad específica para 26 de las muestras ensayadas obteniendo los resultados que se muestran en Tabla 19. Para las muestras que no se realizaron ensayos de Gs se tomaron los valores correspondientes de las muestras que de acuerdo a los aspectos ya mencionados serian similares.

4.2.4 Granulometría – Hidrómetro y Lavados

A partir de los resultados de los ensayos de Límites de Atterberg realizados en Las muestras de suelo del depósito fluvio-lacustre de la Ciudad de Tunja, se encontró que los suelos corresponden principalmente a materiales finos con muy poco contenido de arenas. Teniendo en cuenta lo anterior no se realizaron ensayos de granulometría por tamizado sino de granulometría por hidrómetro y lavado sobre tamiz 200 para algunas de las muestras.

Tabla 18. Resultados ensayo de Hidrómetro

Ensayo N°	Ensayo Bender N°	Muestra	%Limos	%Arcillas	USCS	Descripción
1	9	B-S2M5	44,48	55,52	CL	Arcilla de baja plasticidad
2	19	B-S3M3	43,97	56,03	CL	Arcilla de baja plasticidad
3	20	B-S2M4	45,59	54,41	CH	Arcilla de Alta plasticidad
4	21	B-S2M18	30,50	69,50	CH	Arcilla de Alta plasticidad
5	23	H-S1M10	25,51	74,49	CL	Arcilla de baja plasticidad
6	24	B-S2M12	32,76	67,24	CH	Arcilla de Alta plasticidad

Autor

Tabla 19. Resultados Ensayo Lavado sobre tamiz N° 200

Ensayo Bender N°	% material fino que pasa el tamiz N°200	Peso Platón (g)	Peso Platón + masa seca inicial (g)	Peso Platón + masa seca lavada (g)	Masa Seca Inicial (g)	Masa Seca Lavada (g)
12	45,96	64,47	387,6	239,1	323,13	174,63
22	31,21	57,6	361,29	266,5	303,69	208,9
27	33,97	67,75	371,65	268,4	303,9	200,65

Autor

4.2.5 Contenido de materia orgánica

Teniendo en cuenta que al momento de realizar los ensayos Bender Element algunas muestras estaban desarrollando hongos, debido al tiempo de almacenamiento, a su humedad y composición química, se decidió realizar en estas la determinación de contenido de materia orgánica teniendo como referencia la norma INV E 121 13. En la Tabla 22 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 20. Resultados contenido de materia orgánica de las muestras ensayadas con Bender Element

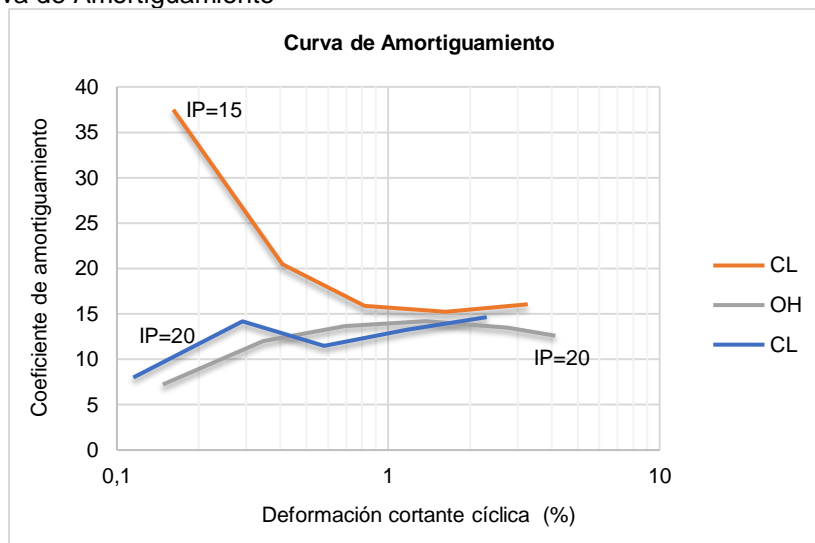
Ensayo Bender N°	Capsula N°	W cáp (g)	W cáp+ms 110 °C (g)	W cáp+ms 445 °C(g)	% de materia orgánica	Clasificación USCS
10	10	17,2	88,5	82,1	9,9	OH
11	11	18,7	65,1	60,2	11,8	CL
14	14	18,7	46,7	43,3	13,8	OL
17	17	18,7	51,8	48	13,0	OH
18	18	18,3	52,4	47,3	17,6	OH
25	25	16,6	133	125,3	7,1	CL
31	31	18,7	72,9	67,2	11,8	OH

Autor

4.3 ENSAYOS TRIAXIALES

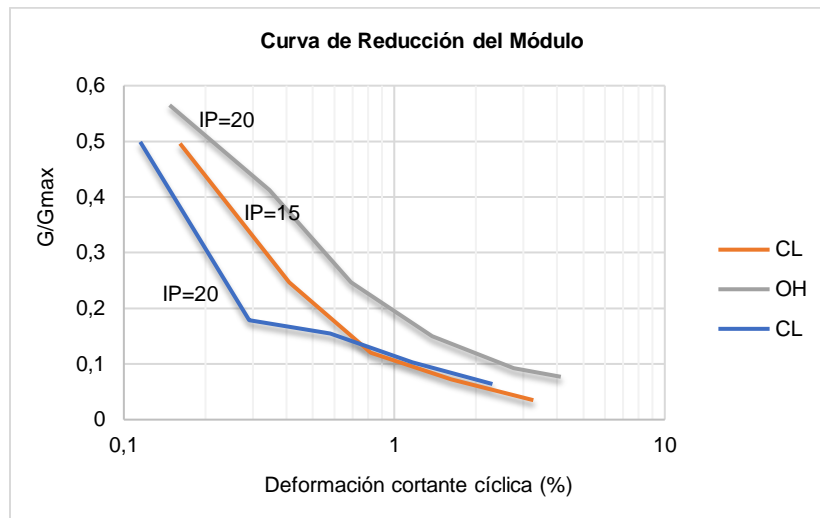
Para tres de las muestras obtenidas en esta investigación, se realizaron ensayos triaxiales con el fin de conocer sus propiedades dinámicas. Como estas muestras hacen parte de las que se usaron en los ensayos Bender Element, sus propiedades básicas ya son conocidas. En las Figuras 43 y 44 se presenta la curva de amortiguamiento y la curva de reducción del módulo para cada Ensayo. En el Anexo B se muestran todos los resultados de los ensayos triaxiales.

Figura 44. Curva de Amortiguamiento



Autor

Figura 45. Curva de Reducción del Módulo



Autor

Tabla 21. Propiedades Básicas de las muestras usadas en el ensayo Triaxial

Ensayo	Muestra	Profundidad (m)	Peso Unitario (Kg/cm ³)	IP	USCS	Gs
1	Las Quintas S1M5	5,0 a 5,5	1,78	15,19	CL	2,6
2	Bomberos S1M9	5,0 a 5,5	1,95	20,41	OH	2,64
3	Bomberos S5M3	1,5 a 2,0	2,18	20,47	CL	2,6

Autor

4.4 PROPIEDADES DINÁMICAS

Con los valores de Vs y Vp encontrados por medio del ensayo Bender Element, en donde se cumple que Vs es menor de 760 m/s, se calculan las propiedades dinámicas del suelo obteniendo los resultados que se presentan en la Tabla 23. La densidad mostrada corresponde al valor obtenido a la hora de realizar el ensayo (estado natural).

Tabla 22. Propiedades Dinámicas

Ensayo	Vs (m/s) Natural	Vp (m/s) Natural	ρ (gr/cm ³)	Gmax (MPa)	Vp/Vs	Relación de Poisson, ν	Módulo de Elasticidad (Kpa)
3	184,861	471,261	1,94	66.296,8	2,5	0,409	186.833,7
4	214,961	491,205	1,93	89.181,9	2,3	0,382	246.420,7
6	224,936	247,122	1,86	94.108,9	1,1	-1,916	-172.320,3
9	257,021	1880,619	1,88	124.192,4	7,3	0,490	370.213,4
10	213,511	233,035	1,84	83.880,0	1,1	-2,114	-186.955,2
11	374,204	436,633	1,98	277.256,7	1,2	-0,883	64.799,1
12	427,981	532,48	2,03	371.830,5	1,2	-0,412	436.909,8
13	291,903	457,51	1,90	161.894,0	1,6	0,157	374.532,4
14	220,446	136,675	1,75	85.043,8	0,6	1,312	393.277,2
15	428,554	434,215	1,99	365.480,5	1,0	-18,302	-12.646.750,2

18	225,74	269,533	1,65	84.081,6	1,2	-0,675	54.698,6
23	434,787	424,001	1,97	372.408,3	1,0	10,704	8.717.442,7
24	520,264	2692,128	1,88	508.868,3	5,2	0,481	1.506.862,9
27	455,973	242,514	1,99	413.743,6	0,5	1,197	1.818.179,1
28	317,202	427,556	2,00	201.234,2	1,3	-0,112	357.342,5
31	469,625	621,897	1,80	396.985,8	1,3	-0,163	664.182,7
32	299,022	199,085	1,76	157.368,9	0,7	1,398	754.774,5

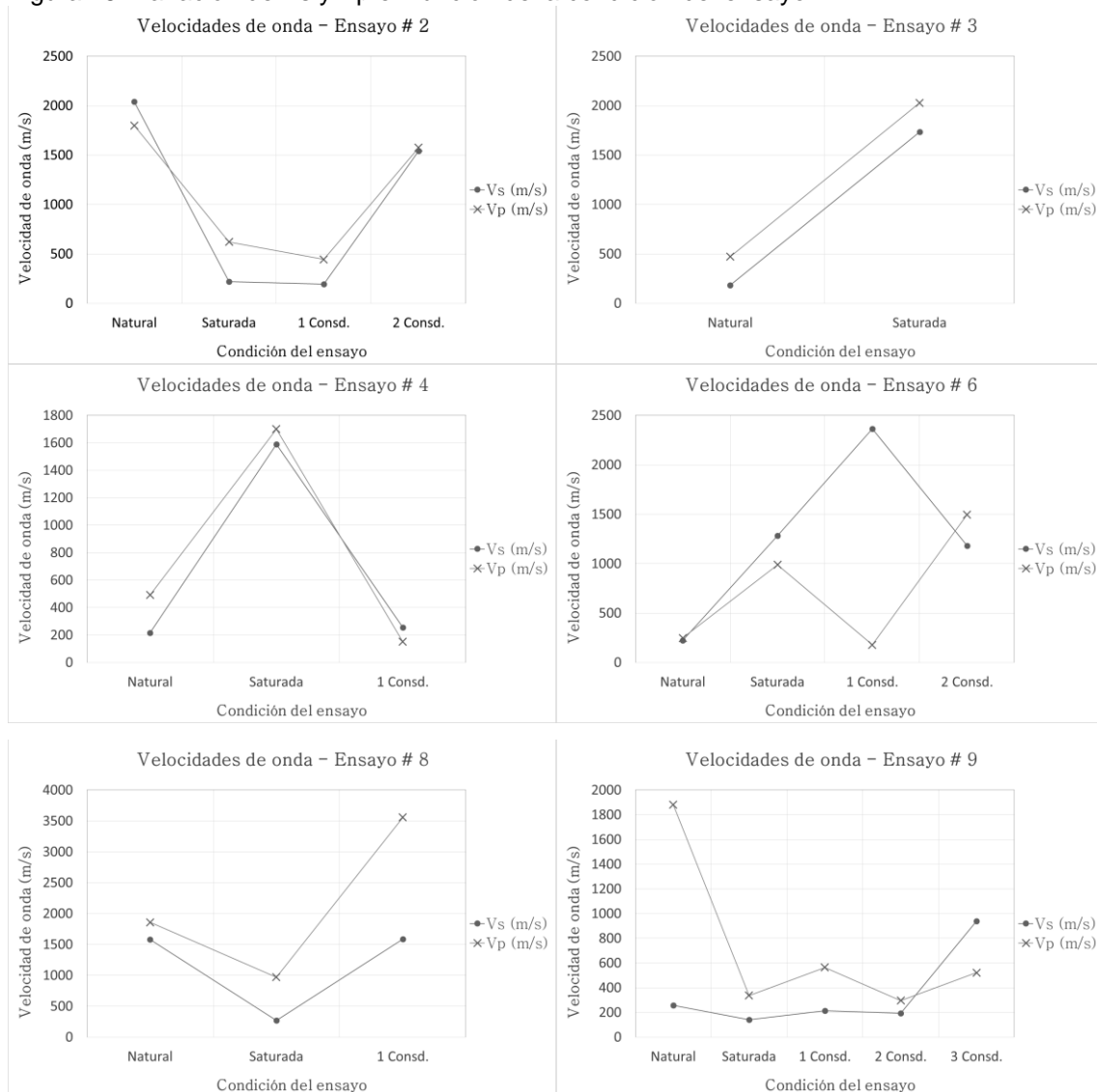
Autor

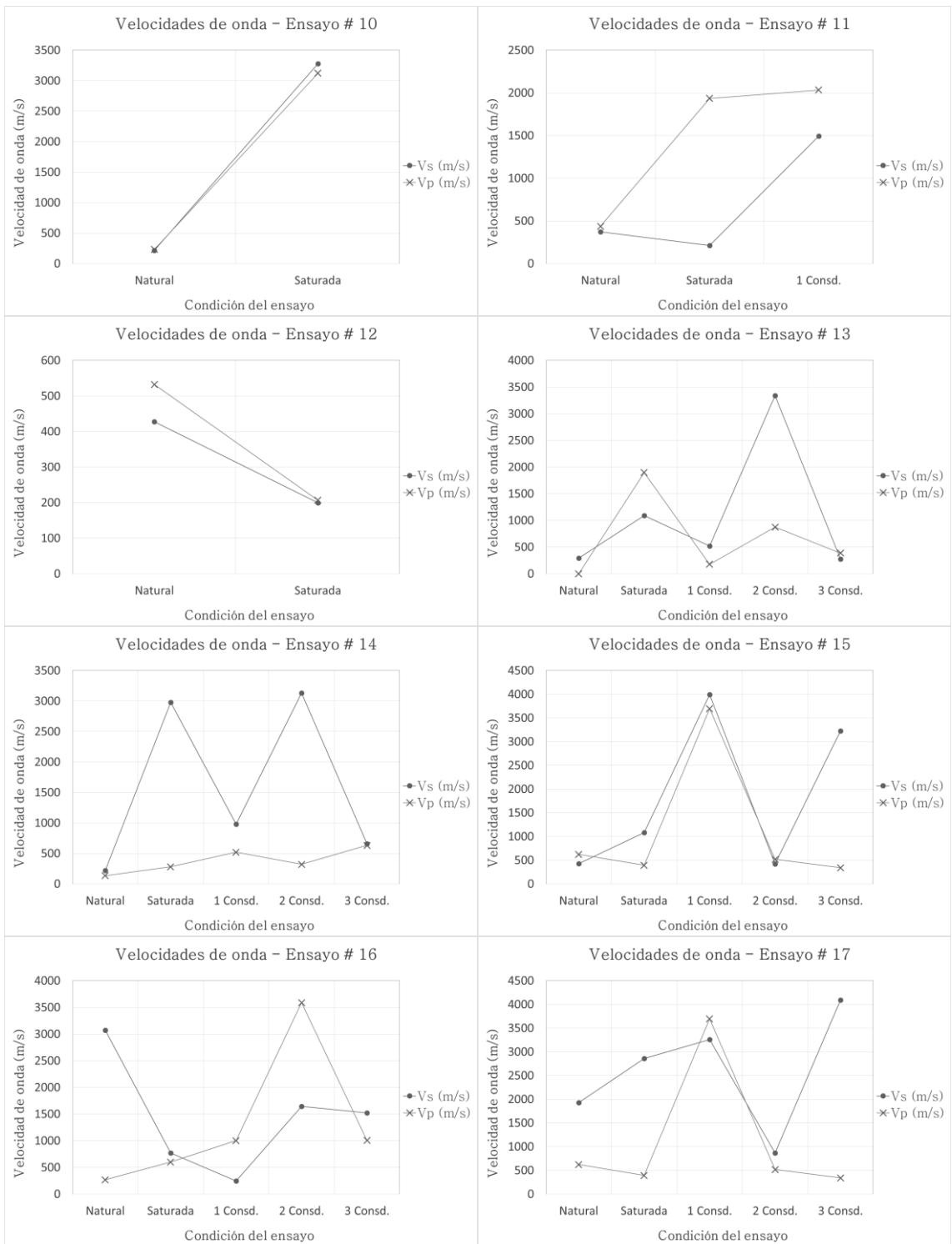
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

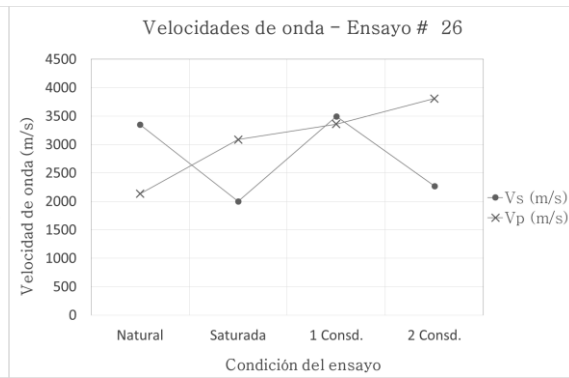
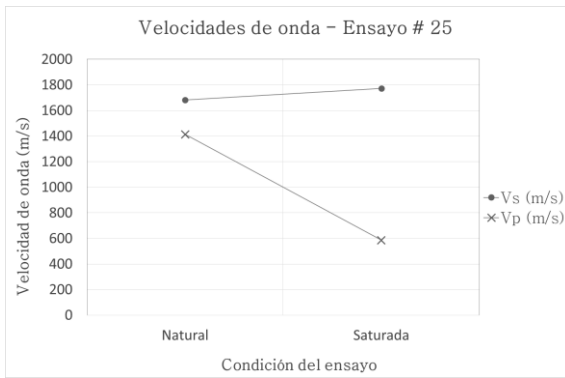
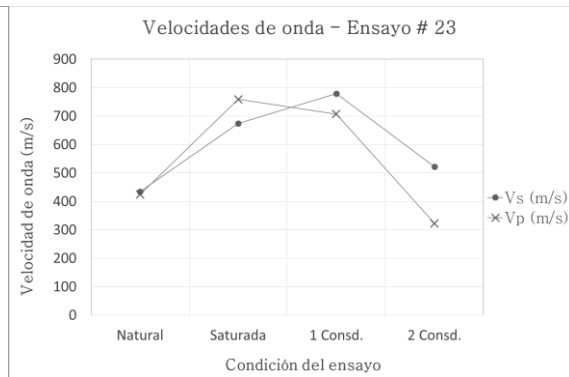
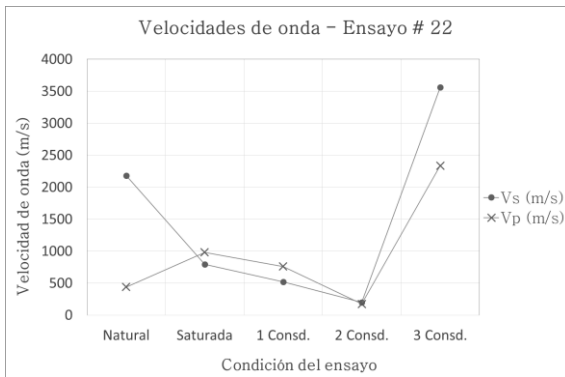
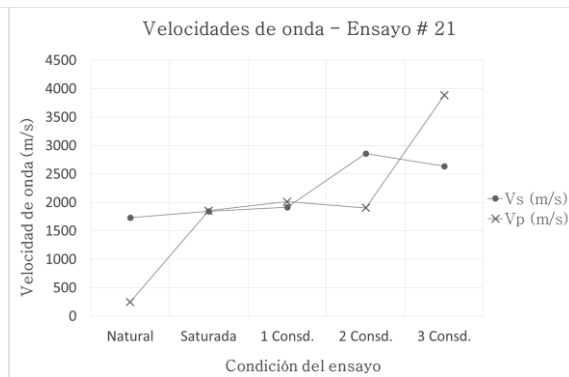
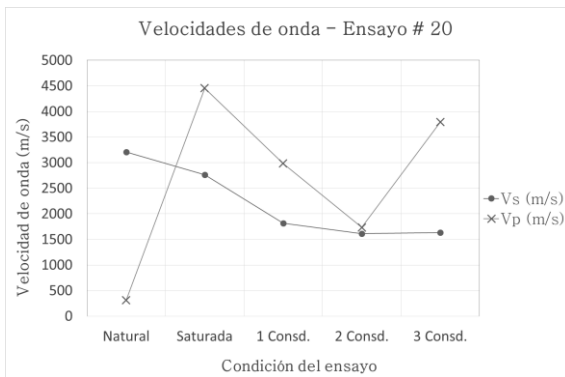
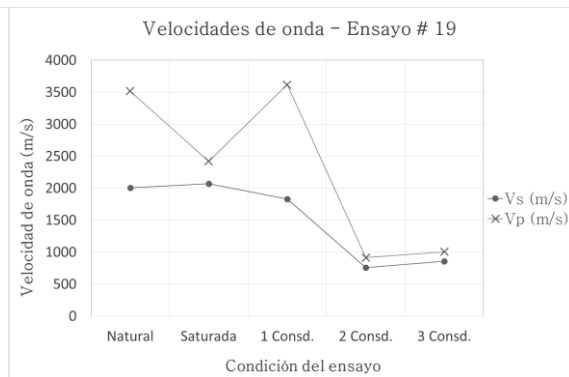
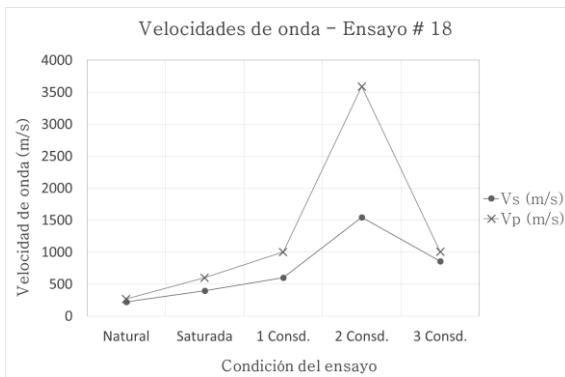
5.1 VARIACIÓN DE V_s Y V_p SEGÚN LA CONDICIÓN DEL ENSAYO

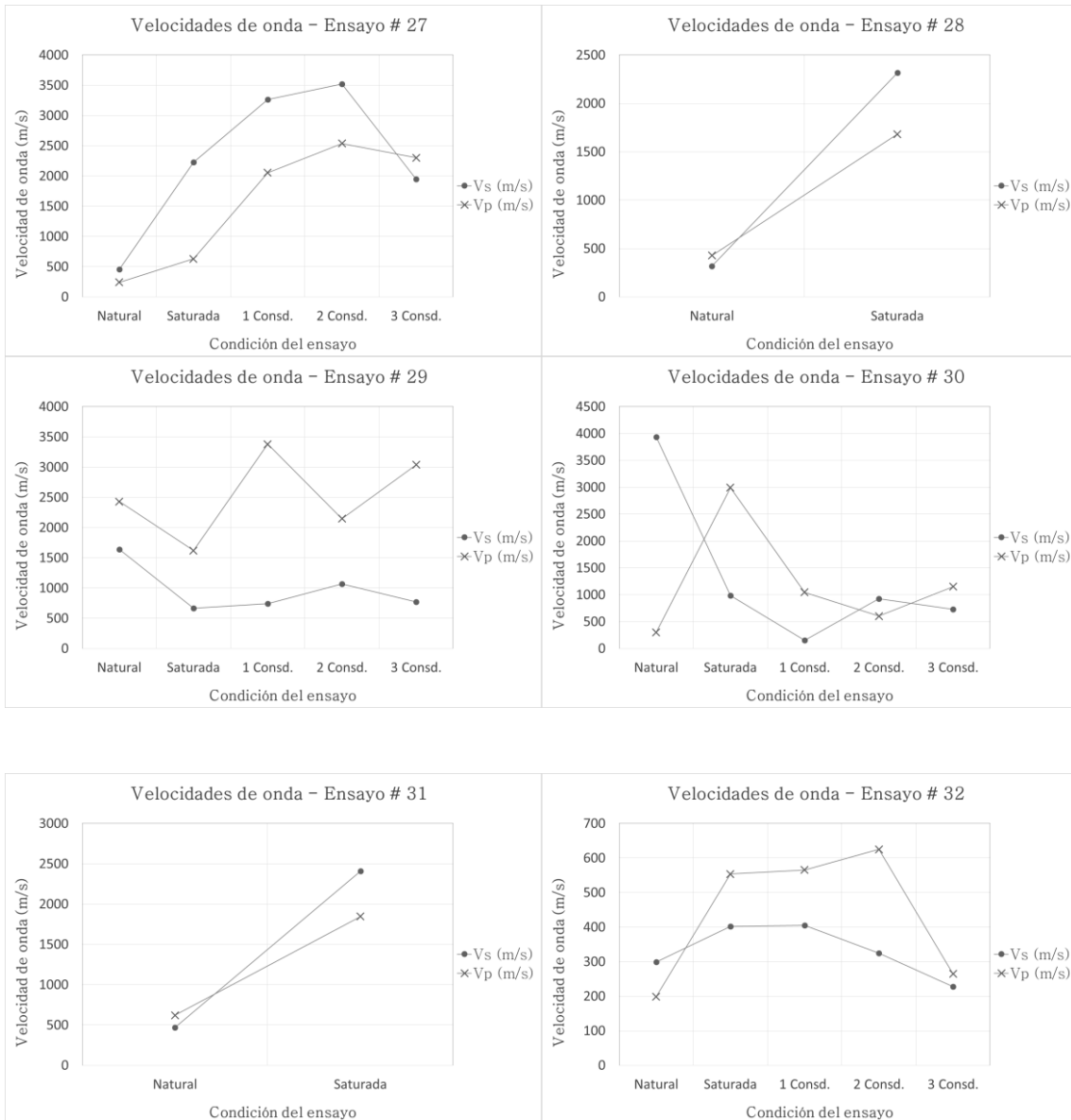
Para los ensayos Bender Element en los que fue posible realizar la medición de las velocidades en una condición diferente a la condición natural, se presentan curvas que muestran la variación de los valores de velocidad de V_s y V_p en función de la condición del ensayo, ver Figura 46.

Figura 46. Variación de V_s y V_p en función de la condición del ensayo









Autor

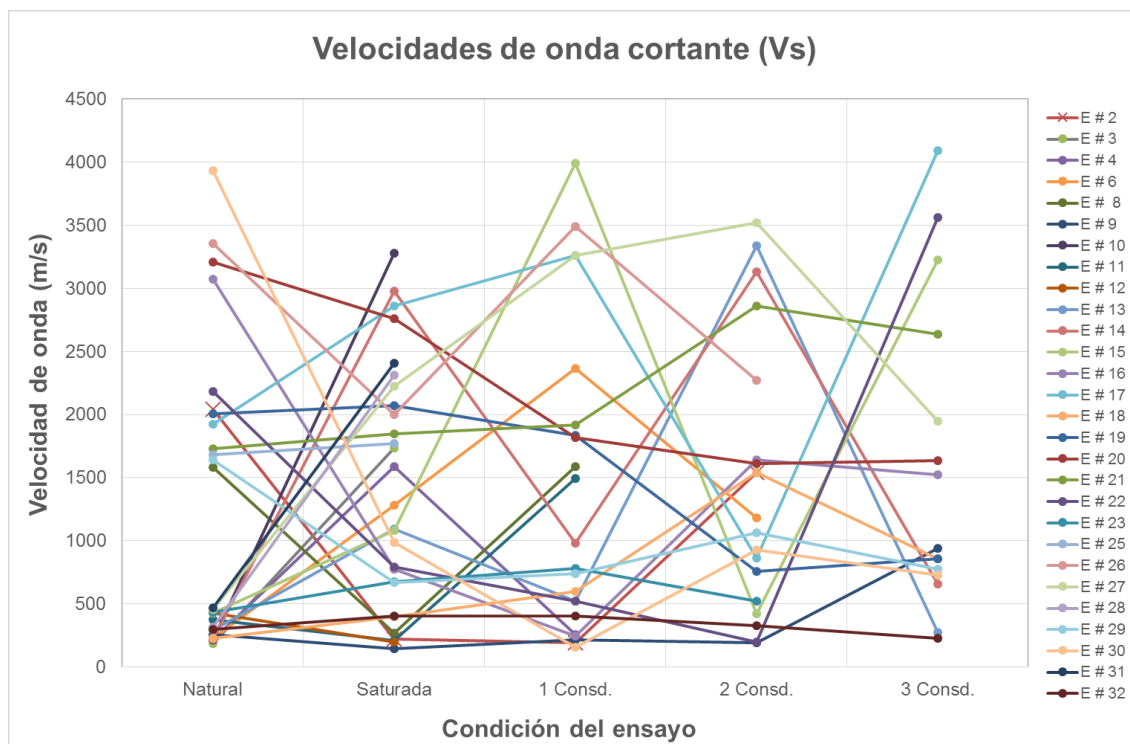
En la Figura 46 es posible observar que el comportamiento en cada uno de los ensayos es bastante variable para las condiciones bajo las cuales se realizaron, dificultando poder identificar una tendencia de su comportamiento. Esto se atribuye a la alta sensibilidad que presenta el ensayo durante su ejecución.

Al cambiar de la condición del ensayo de saturada a las tres consolidaciones siguientes, se esperaría que la densificación de la muestra de suelo ocasionara que los valores de velocidad aumentaran, es decir que presentaran una tendencia creciente, sin embargo debido a la alta variabilidad de los resultados esto no es apreciable de manera continua, solo en algunos casos en el cambio de una condición a otra.

5.1.1 Variación Vs en función de la condición del ensayo

En la Figura 47 se presenta de manera simultánea la variación de Vs de los ensayos realizados, con el fin de poder compararlos más fácilmente, así como identificar si existe o no un comportamiento en común. No se presentan los ensayos 1, 5, 7 y 24 por las condiciones ya mencionadas

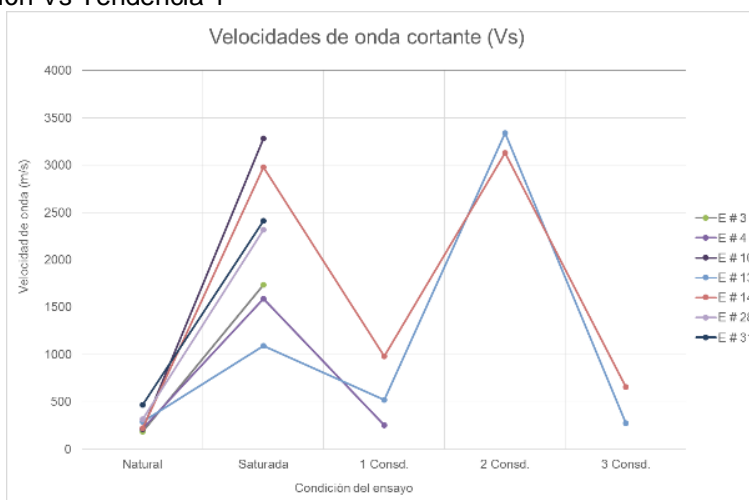
Figura 47. Variación de Vs para todos los ensayos realizados en condiciones adicionales a la natural



Autor

A partir de la Figura 47 se identifican aquellos ensayos que presentan un comportamiento similar y se agrupan en una sola gráfica, mostrando también sus propiedades básicas con el fin de comparar y analizar si existen otros aspectos en común que determinen cada uno de los comportamientos.

Figura 48. Variación Vs Tendencia 1



Autor

Tabla 23. Propiedades básicas de ensayos Bender Element - Tendencia 1

# Ensayo Bender	Muestra	Prof (m)	w (%)	LL (%)	LP (%)	LC (%)	IP (%)	IL	IC	Clasificación USCS	GS
3	H-S2M7	4,0 a 4,5	25,20	64,99	46,94	-	18,05	-1,20	2,20	MH	2,77
4	B-S2M3	1,5 a 2,0	30,63	51,03	24,36	18,32	26,67	0,23	0,77	CH	2,75
10	B-S1M8	4,5 a 5,0	20,78	51,74	31,33	26,50	20,41	-0,52	1,52	OH	2,64
13	H-S1M11	6,0 a 6,5	19,23	51,23	33,51	-	17,72	-0,81	1,81	MH	2,69
14	B-S1M7	3,5 a 4,0	40,91	49,60	28,49	23,27	21,11	0,59	0,41	OL	2,62
28	B-S2M11	5,5 a 6,0	20,34	47,15	26,66	24,97	20,49	-0,31	1,31	CL	2,59
31	B-S3M6	3,5 a 4,0	22,44	51,00	30,63	30,23	20,37	-0,40	1,40	OH	2,62

Autor

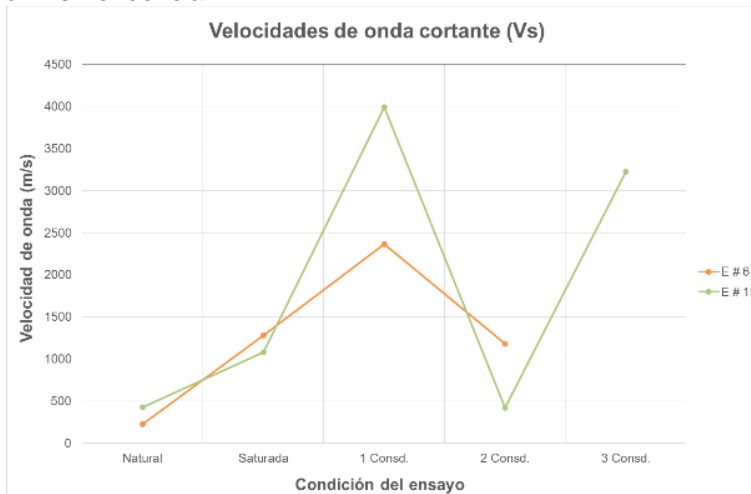
En la Figura 48 se observa para los ensayos indicados una tendencia creciente en el cambio de la velocidad (V_s) de la condición natural a la saturada y de la primera consolidación a la segunda consolidación. En el cambio de la condición saturada a la primera consolidación y de la segunda consolidación a la tercera, se observa una tendencia decreciente con un cambio abrupto en las velocidades. Posiblemente en la medición de V_s para la segunda condición y para la tercera se presentó algún tipo de variable que hizo que las velocidades se aumentaran considerablemente y superaran los 760 m/s, por esta razón los valores de V_s para estas condiciones no serían aceptables.

Tenido en cuenta el cambio en la condición del ensayo se esperaría que la tendencia de la curva se mantuviera durante el cambio de las tres consolidaciones, sin embargo esto no se observa.

De acuerdo con la clasificación USCS este comportamiento no es propio de un solo tipo de suelo, ya que en este caso se presentan en suelos MH, OH y CH.

El seguimiento a la relación de vacíos durante las diferentes condiciones del ensayo, se hace a partir de los incrementos de agua que se presentan en cada caso.

Figura 49. Variación Vs Tendencia 2



Autor

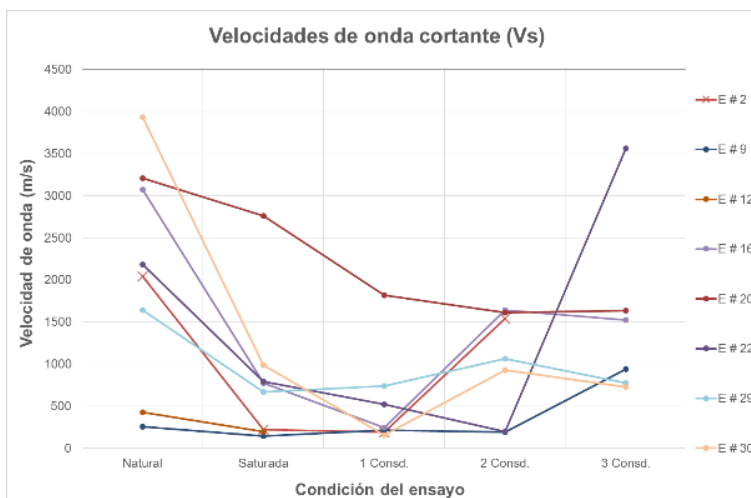
Tabla 24. Propiedades básicas de ensayos Bender Element - Tendencia 2

# Ensayo Bender	Muestra	Prof (m)	w (%)	LL (%)	LP (%)	LC (%)	IP (%)	IL	IC	Clasificación USCS	GS
6	H-S2M6	3,5 a 4,0	38,14	51,46	33,51	-	17,95	0,26	0,74	MH	2,65
15	B-S1M2	1,0 a 1,5	9,67	50,41	15,24	-	35,17	-0,16	1,16	CH	2,71

Autor

Los ensayos # 6 y 15 presentan una tendencia creciente hasta la primera consolidación, pero al llegar a la segunda presentan una disminución abrupta en sus valores. La clasificación USCS correspondiente para las muestras empleados en estos dos ensayos muestran una tipología de suelo diferente.

Figura 50. Variación Vs Tendencia 3



Autor

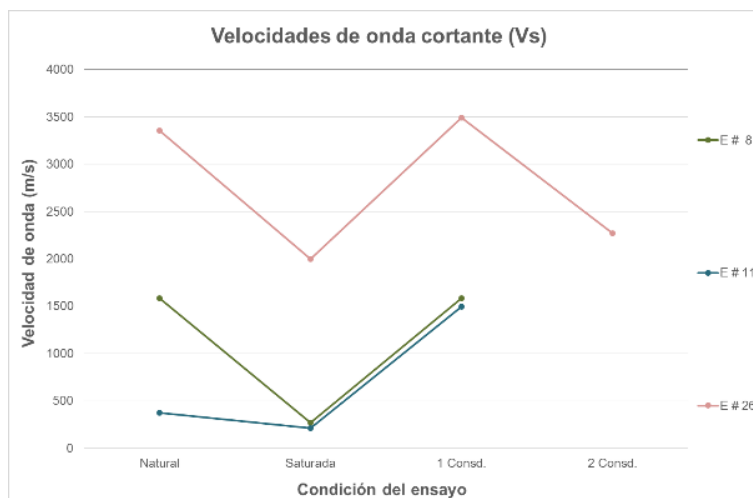
Tabla 25. Propiedades básicas de ensayos Bender Element - Tendencia 3

# Ensayo Bender	Muestra	Prof (m)	w (%)	LL (%)	LP (%)	LC (%)	IP (%)	IL	IC	Clasificación USCS	GS
2	H-S1M7	3,5 a 4,0	32,50	51,23	33,51	-	17,72	-0,06	1,06	MH	2,70
9	B-S2M5	2,5 a 3,0	24,87	47,41	22,47	18,43	24,94	0,10	0,90	CL	2,71
12	B-S2M4	2,0 a 2,5	15,49	50,62	24,04	-	26,58	-0,32	1,32	CH	2,68
16	B-S5M5	2,5 a 3,0	19,70	46,60	26,13	12,87	20,47	-0,31	1,31	CL	2,60
20	B-S2M4V2	2,0 a 2,5	25,92	50,62	24,04	-	26,58	0,07	0,93	CH	2,68
22	B-S4M9	5,0 a 5,5	31,30	41,65	28,99	-	12,66	0,18	0,82	CL	2,61
29	C-S1M1	2,70 a 3,0	30,44	37,55	21,02	17,02	16,53	0,57	0,43	CL	2,57
30	C-S1M2	0,0 a 10,0	24,19	45,41	28,99	24,41	16,42	-0,29	1,29	ML	2,61

Autor

Para esta tendencia los valores de Vs disminuyen notablemente de la condición natural a la saturada, sin embargo es importante resaltar que varios de las velocidades están por encima del valor máximo de Vs que puede tomar un suelo teniendo como referencia la NSR 10 ($V_s \leq 760$ m/s). Para los valores de Vs en condición natural menores a 760 m/s se observa una tendencia creciente al comenzar a consolidar el suelo hasta la segunda consolidación y en la última consolidación los valores disminuyen. Observando el comportamiento que presenta el suelo según sus límites y humedad natural, así como la clasificación USCS para las muestras ensayadas, no se observa una característica en común que determine este comportamiento.

Figura 51. Variación Vs Tendencia 4



Autor

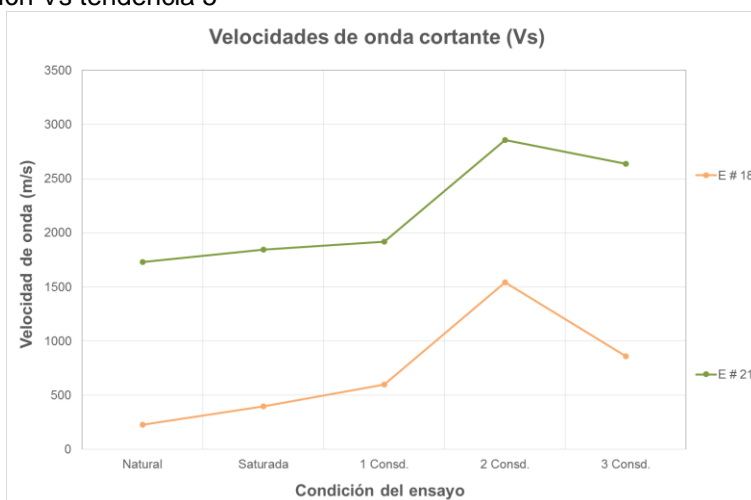
Tabla 26. Propiedades básicas de ensayos Bender Element - Tendencia 4

# Ensayo Bender	Muestra	Prof (m)	w (%)	LL (%)	LP (%)	LC (%)	IP (%)	IL	IC	Clasificación USCS	GS
8	H-S2M3v2	2,0 a 2,5	14,88	58,30	48,63	-	9,67	-3,49	4,49	MH	2,74
11	B-S2M8	4,0 a 4,5	16,39	37,98	20,53	18,32	17,46	-0,24	1,24	CL	2,64
26	B-S1M3	1,5 a 2,0	20,01	46,08	23,36	22,21	22,72	-0,15	1,15	CL	2,65

Autor

En la tendencia 4 se observa un comportamiento decreciente en Vs al saturar la muestra y al generar la primera consolidación pasa lo contrario, el valor de Vs aumenta. En este caso las tres muestras presentan un comportamiento semisólido; dos de ellas corresponden a arcillas de baja plasticidad y la otra a limos orgánicos de alta plasticidad.

Figura 52. Variación Vs tendencia 5



Autor

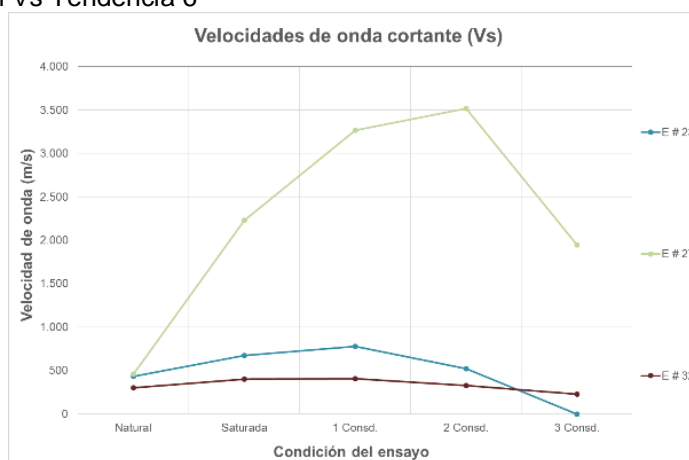
Tabla 27. Propiedades básicas de ensayos Bender Element - Tendencia 5

# Ensayo Bender	Muestra	Prof (m)	w (%)	LL (%)	LP (%)	LC (%)	IP (%)	IL	IC	Clasificación USCS	GS
18	B-S1M8v2	4,5 a 5,0	45,69	51,74	31,33	26,50	20,41	0,70	0,30	OH	2,64
21	B-S2M18	9,0 a 9,5	34,92	51,86	26,86	20,57	25,01	0,32	0,68	CH	2,66

Autor

En este caso se presenta una tendencia creciente hasta la segunda consolidación en donde comienza a decrecer. Las muestras empleadas en el ensayo 18 y 21 corresponden a limos orgánicos y arcilas que tienen en común que son de alta plasticidad y que presentan un comportamiento plástico.

Figura 53. Variación Vs Tendencia 6



Autor

Tabla 28. Propiedades básicas de ensayos Bender Element – Tendencia 6

# Ensayo Bender	Muestra	Prof (m)	w (%)	LL (%)	LP (%)	LC (%)	IP (%)	IL	IC	Clasificación USCS	GS
23	H-S1M10	5,0 a 5,5	24,26	49,26	26,35	24,77	22,92	-0,09	1,09	CL	2,52
27	B-S1M4	2,0 a 2,5	10,28	46,08	23,36	22,21	22,72	-0,58	1,58	CL	2,65
32	Q-S1M2	2,8 a 3,2	37,75	37,97	22,78	-	15,19	0,99	0,01	CL	2,60

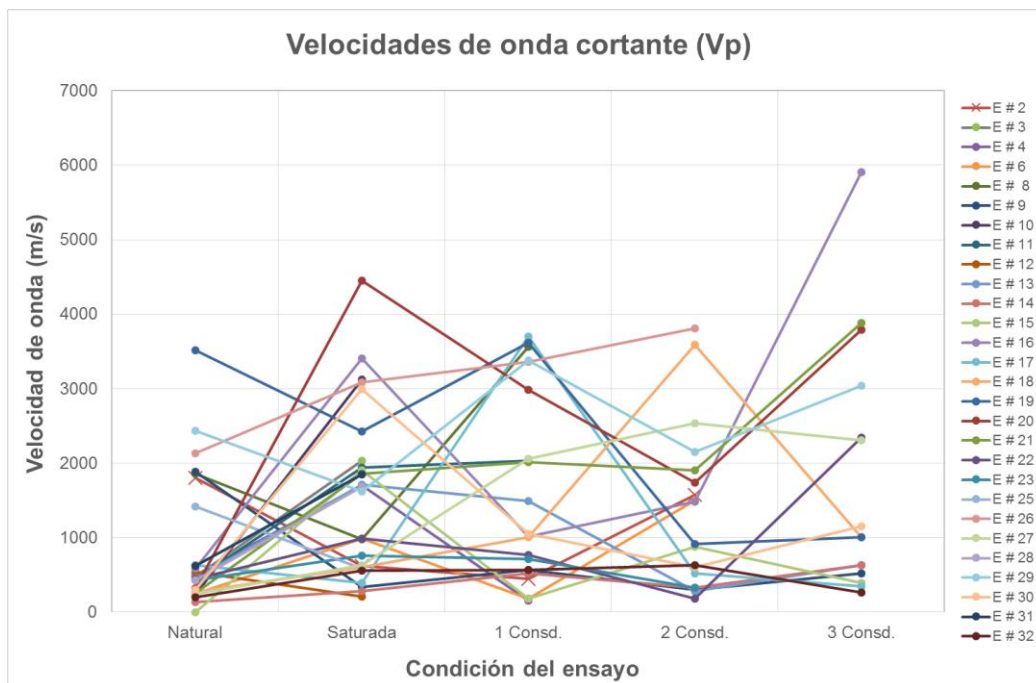
Autor

Para los ensayos 23, 27 y 32 se observa una comportamiento de Vs creciente hasta la primera consolidación, y desde está a la tercera consolidación las velocidades comienzan a disminuir, estos cambios abruptos pueden haberse generado por posibles daños en la muestra al realizar el proceso de consolidación o también por modificaciones en el orificio en el cual se introdujo el Elemento Bender.

5.1.2 Variación Vp en función de la condición del ensayo

En la siguiente gráfica se presenta la variación de Vp para todos los ensayos realizados en cada una de las condiciones planteadas para poder observar o agrupar los ensayos con tendencias similares. No se presenta el ensayo # 5 ya que no se tienen mediciones de este.

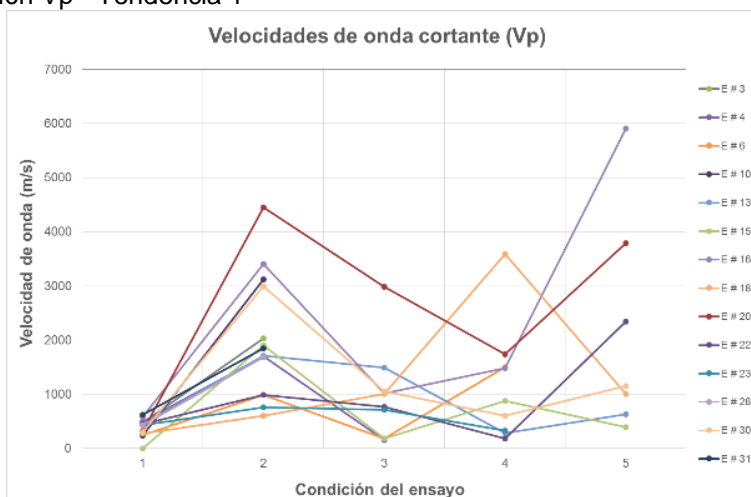
Figura 54. Variación de Vp para todos los ensayos



Autor

En la figura 54 se muestra el comportamiento de Vp en función de la condición del ensayo y al igual que para Vs existe una alta variabilidad en estos valores dificultando identificar una tendencia en común para todos los ensayos. Teniendo en cuenta lo anterior, se identifica tendencias similares y se agrupan de la siguiente manera:

Figura 55. Variación Vp - Tendencia 1



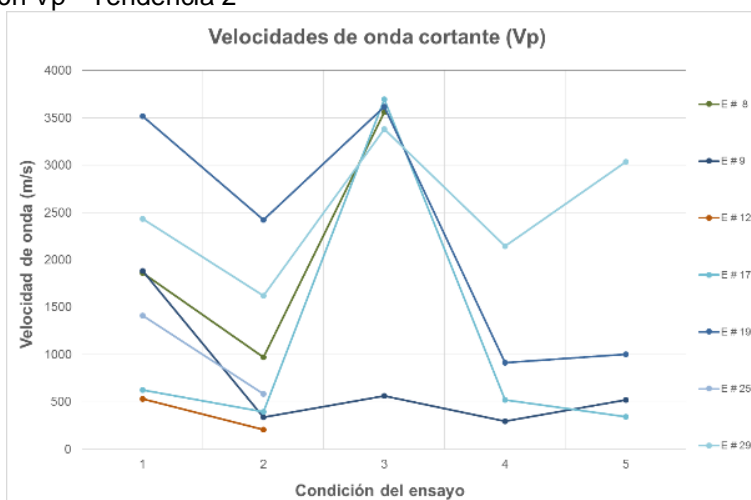
Autor

Tabla 29. Propiedades básicas de ensayos Bender Element – Tendencia 1 Vp

# Ensayo Bender	Muestra	Prof (m)	w (%)	LL (%)	LP (%)	LC (%)	IP (%)	IL	IC	Clasificación USCS	GS
3	H- S2M7	4,0 a 4,5	25,20	64,99	46,94	-	18,05	-1,20	2,20	MH	2,77
4	B- S2M3	1,5 a 2,0	30,63	51,03	24,36	18,32	26,67	0,23	0,77	CH	2,75
6	H- S2M6	3,5 a 4,0	38,14	51,46	33,51	-	17,95	0,26	0,74	MH	2,65
10	B- S1M8	4,5 a 5,0	20,78	51,74	31,33	26,50	20,41	-0,52	1,52	OH	2,64
13	H- S1M11	6,0 a 6,5	19,23	51,23	33,51	-	17,72	-0,81	1,81	MH	2,69
15	B- S1M2	1,0 a 1,5	9,67	50,41	15,24	-	35,17	-0,16	1,16	CH	2,71
16	B- S5M5	2,5 a 3,0	19,70	46,60	26,13	12,87	20,47	-0,31	1,31	CL	2,60
18	B- S1M8 V2	4,5 a 5,0	45,69	51,74	31,33	26,50	20,41	0,70	0,30	OH	2,64
20	B- S2M4 V2	2,0 a 2,5	25,92	50,62	24,04	-	26,58	0,07	0,93	CH	2,68
22	B- S4M9	5,0 a 5,5	31,30	41,65	28,99	-	12,66	0,18	0,82	CL	2,61
23	H- S1M10	5,0 a 5,5	24,26	49,26	22,72	24,77	22,92	-0,09	1,09	CL	2,52
26	B- S1M3	1,5 a 2,0	20,01	46,08	23,36	22,21	22,72	-0,15	1,15	CL	2,65
30	C- S1M2	0,0 a 10,0	24,19	45,41	28,99	24,41	16,42	-0,29	1,29	ML	2,61
31	B- S3M6	3,5 a 4,0	22,44	51,00	30,63	30,23	20,37	-0,40	1,40	OH	2,62

Autor

Figura 56 Variación Vp - Tendencia 2



Autor

Tabla 30. Propiedades básicas de ensayos Bender Element – Tendencia 2 Vp

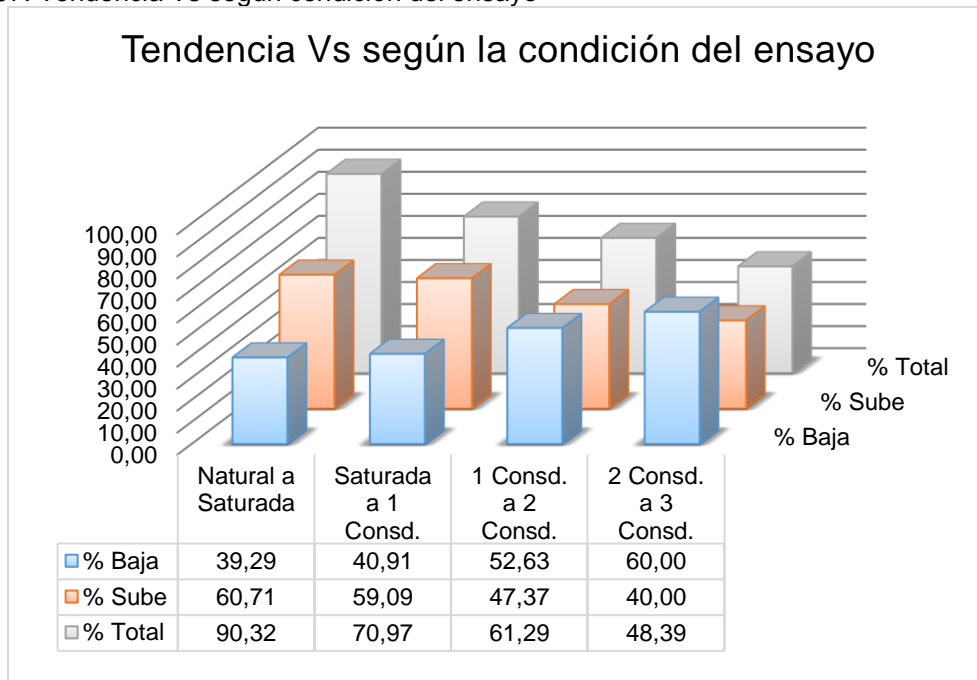
# Ensayo Bender	Muestra	Prof (m)	w (%)	LL (%)	LP (%)	LC (%)	IP (%)	IL	IC	Clasificación USCS	GS
8	H- S2M3 V2	2,0 a 2,5	14,88	58,30	48,63	-	9,67	-3,49	4,49	MH	2,74
9	B- S2M5	2,5 a 3,0	24,87	47,41	22,47	18,43	24,94	0,10	0,90	CL	2,71
12	B- S2M4	2,0 a 2,5	15,49	50,62	24,04	-	26,58	-0,32	1,32	CH	2,68
17	B- S3M4	2,5 a 3,0	20,09	55,17	32,48	-	22,69	-0,55	1,55	OH	2,60
19	B- S3M3	2,0 a 2,5	19,93	48,32	24,76	17,44	23,56	-0,20	1,20	CL	2,78
25	B- S5M9	5,0 a 5,5	28,62	48,92	31,75	19,84	17,17	-0,18	1,18	CL	2,59
29	C- S1M1	2,70 a 3,0	30,44	37,55	21,02	17,02	16,53	0,57	0,43	CL	2,57

Autor

En la segunda tendencia identificada, en el cambio de Vp de la condición natural a la saturada se observa todo lo contrario a la tendencia 1, en esta es posible evidenciar un comportamiento decreciente al igual que en el cambio de la primera consolidación a la segunda. Del estado saturado a la primera consolidación, y de la segunda consolidación a la tercera, se observan comportamientos crecientes.

5.2 ANÁLISIS PORCENTUAL PARA V_S Y V_P

Figura 57. Tendencia Vs según condición del ensayo

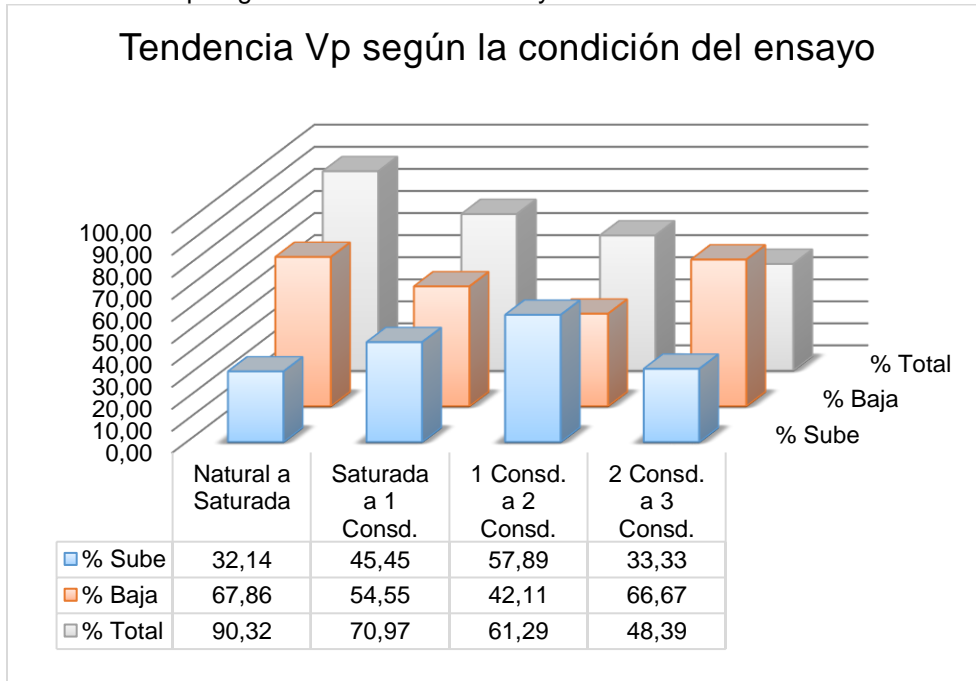


Autor

En la figura 57 se hace un análisis porcentual de las posibles tendencias para las condiciones planteadas en la investigación. En esta se puede observar que sólo en el 48,39% del total de ensayos realizados fue posible culminar hasta la última condición esperada generando una rentabilidad baja para el ensayo.

En la condición natural, saturada y la primera consolidación, la característica que prevalece es que un poco más de la mitad presentan tendencias crecientes, caso contrario se observa en el cambio de la segunda consolidación a la tercera.

Figura 58. Tendencia Vp según la condición del ensayo



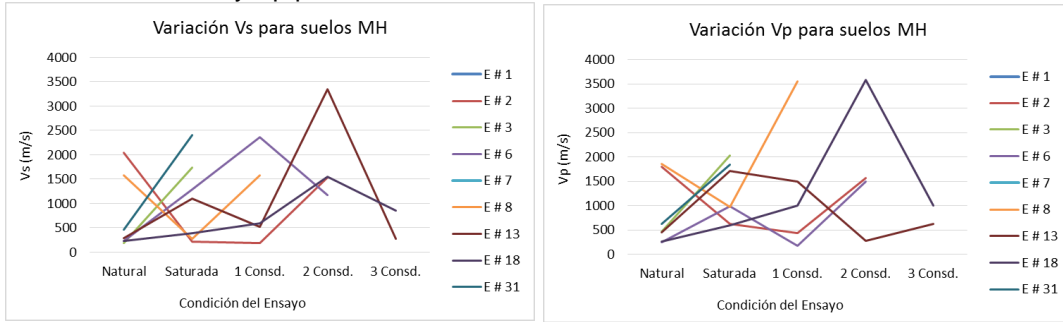
Autor

En la Figura 58 se hace un análisis porcentual de la variación de Vp al cambiar la condición del ensayo, observando inicialmente que no hay un comportamiento sobresaliente en todos los ensayos realizados. El mayor porcentaje muestra una tendencia decreciente en el cambio de Vp al pasar de la condición natural a la saturada, de la saturada a la primera consolidación y de la segunda a la tercera consolidación. La variación de Vp en el cambio de la primera a la segunda consolidación, muestra un comportamiento contrario, en donde el mayor porcentaje presenta una tendencia creciente. Es importante aclarar que después de identificar estos comportamientos ninguno supera el 68% del total, indicando que es necesario realizar más ensayos que permitan aumentar la confiabilidad de cada uno de ellos.

5.3 VARIACIÓN DE V_S Y V_P SEGÚN TIPO DE SUELO

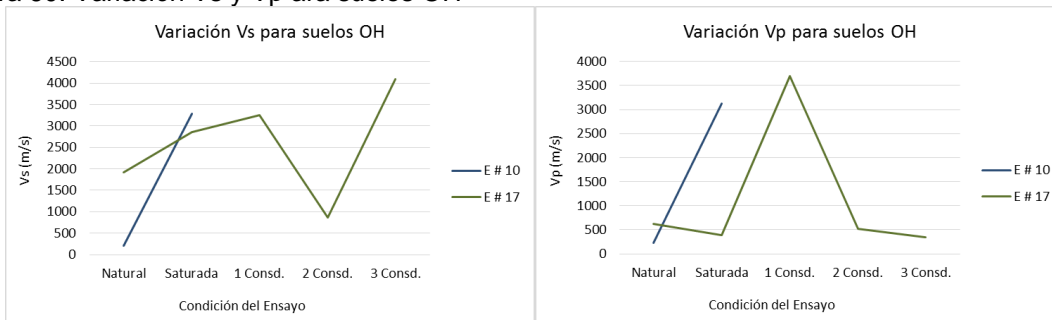
De acuerdo con los tipos de suelo encontrados según la caracterización de Límites de Atterberg, se agruparon los resultados de velocidades de onda y se representaron en las siguientes gráficas con el fin de observar la variación de las velocidades en función de la condición del ensayo.

Figura 59. Variación Vs y Vp para suelos MH



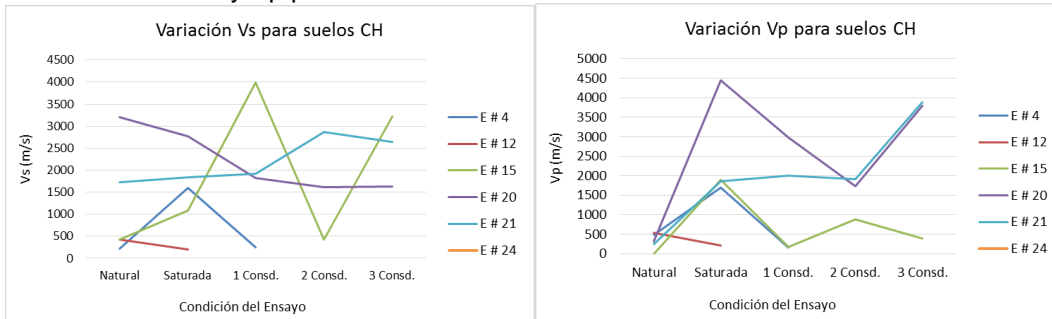
Autor

Figura 60. Variación Vs y Vp para suelos OH



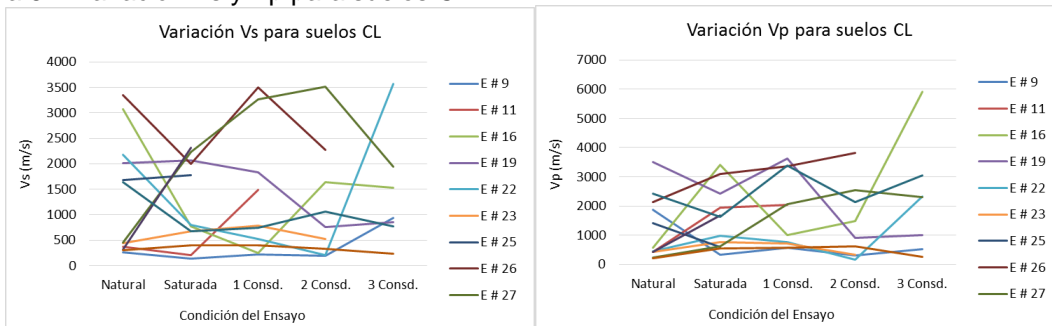
Autor

Figura 61. Variación Vs y Vp para suelos CH



Autor

Figura 62. Variación Vs y Vp para suelos CL



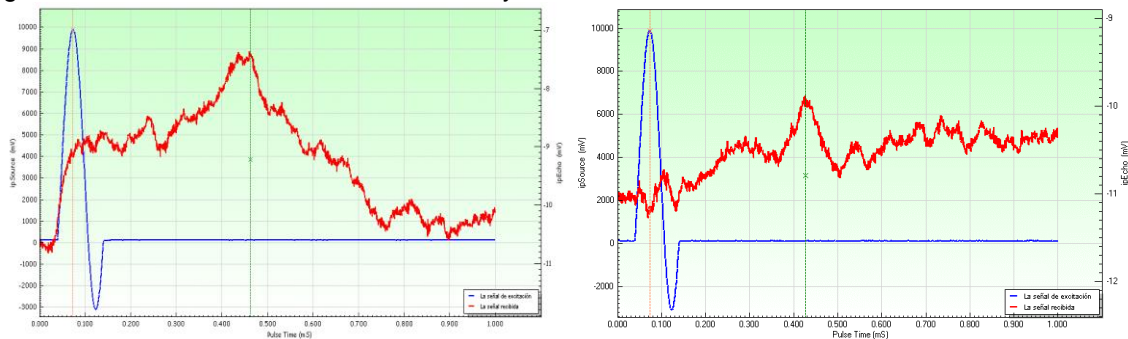
Autor

Al agrupar las velocidades de onda V_s y V_p , para un mismo suelo teniendo en cuenta la clasificación USCS, se observa que el tipo de suelo y la condición del ensayo no son determinantes para observar un comportamiento en común a ellos. Esto se puede evidenciar en las Figuras de la 59 a la 62, en donde la alta variación de todas las velocidades halladas mediante el ensayo Bender Element no permite que se pueda identificar un comportamiento en común, esto se atribuye a la alta sensibilidad que presenta el ensayo durante su proceso de ejecución como consecuencia de las variables ya mencionadas.

5.4 VARIACIÓN V_s EN UN MISMO ENSAYO

La alta sensibilidad del ensayo se pudo observar en cada una de las mediciones realizadas, ya que al generar una medición bajo ciertas condiciones y luego repetirla bajo las mismas condiciones, se obtenían registros totalmente diferentes y en algunos casos estos mostraban un pico en común. El programa da la opción de realizar diferentes mediciones y luego generar una curva resultante que surge del promedio de las mismas. A continuación se muestra como ejemplo las mediciones obtenidas en el ensayo Bender #9 para V_s .

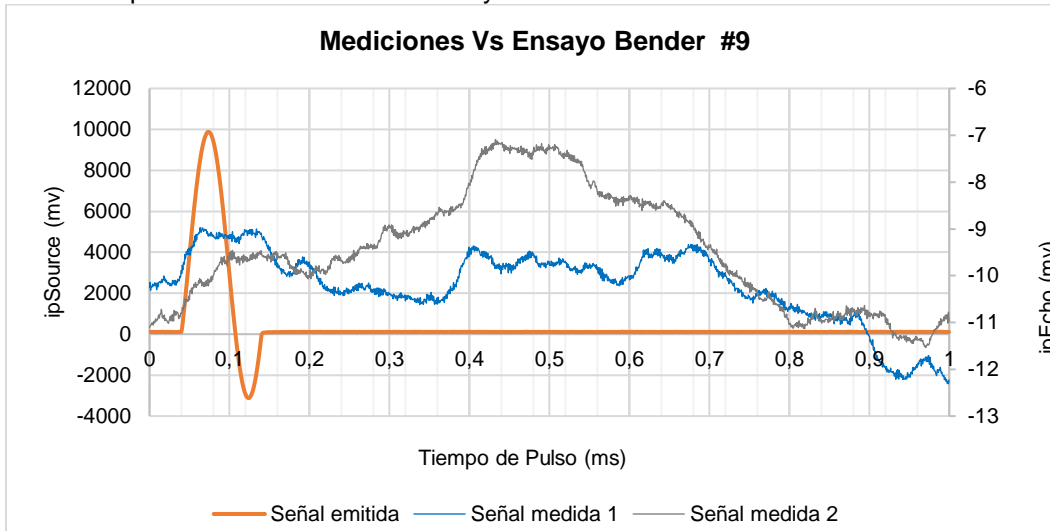
Figura 63. Mediciones realizadas en el ensayo Bender Element #9



Autor

En la figura 63 se puede observar como las dos señales presentan un pico que se encuentra en el intervalo de 0,4 a 0,5 mS, pero no coinciden en un mismo valor. A mayor número de mediciones que tuvieran un pico localizado en cierto intervalo la señal resultante es más representativa, sin embargo en algunas mediciones esto no ocurría ya que los picos se alejaban bastante de una medición a la otra. Lo anterior se atribuye a la alta sensibilidad que presenta el ensayo al ruido.

Figura 64. Comparación mediciones del ensayo Bender Element #9



Autor

En la Figura 64 se presentan de manera simultánea las dos señales medidas para la determinación de V_s en el ensayo Bender Element #9 bajo las mismas condiciones de entrada. Es posible observar que el pico de cada una de las señales no siempre es tan claro como el de la señal que se está emitiendo. La variación en las dos señales medidas se puede atribuir al ruido externo que se presente al momento de realizar el ensayo o al acomodamiento de las partículas que se pueda generar a medida que las ondas van atravesando la muestra.

Es importante aclarar que la fábrica del suelo también determina los valores de velocidades de onda (V_s y V_p), y los cambios que se puedan presentar en la fábrica del suelo por el paso de las ondas afectarían los resultados de las velocidades de onda.

5.5 RELACIÓN V_s CON V_p

Con los valores de velocidad medidos se determina la relación existente entre el V_s y V_p , teniendo como referencia la relación teórica planteada por Kramer [1] para materiales geológicos con un valor típico de relación de Poisson de 0.3, en donde $V_p/V_s=1,87$

Tabla 31. Relación Vp/Vs

Ensayo	Vp/Vs				
	Natural	Saturada	1 Consd.	2 Consd.	3 Consd.
1	0,82	-	-	-	-
2	0,88	2,83	2,30	1,02	-
3	2,55	1,17	-	-	-
4	2,29	1,07	0,59	-	-
5	-	-	-	-	-
6	1,10	0,77	0,08	1,27	-
7	1,09	-	-	-	-
8	1,18	3,62	2,24	-	-
9	7,32	2,37	2,64	1,53	0,56
10	1,09	0,95	-	-	-
11	1,17	9,15	1,36	-	-
12	1,24	1,03	-	-	-
13	1,57	1,56	2,87	0,08	2,29
14	0,62	0,09	0,53	0,10	0,96
15	0,99	1,76	0,04	2,08	0,12
16	0,19	4,41	4,15	0,90	3,87
17	0,32	0,14	1,13	0,60	0,08
18	1,19	1,51	1,67	2,33	1,17
19	1,75	1,17	1,97	1,21	1,17
20	0,10	1,61	1,64	1,07	2,32
21	0,14	1,01	1,05	0,67	1,47
22	0,20	1,23	1,46	0,88	0,66
23	0,98	1,13	0,91	0,62	-
24	5,17	-	-	-	-
25	0,84	0,33	-	-	-
26	0,64	1,54	0,96	1,68	-
27	0,53	0,28	0,63	0,72	1,18
28	1,35	0,73	-	-	-
29	1,48	2,42	4,57	2,01	3,93
30	0,08	3,04	6,83	0,65	1,58
31	1,32	0,77	-	-	-
32	0,67	1,38	1,40	1,92	1,16
Promedio	1,32	1,75	1,86	1,12	1,50

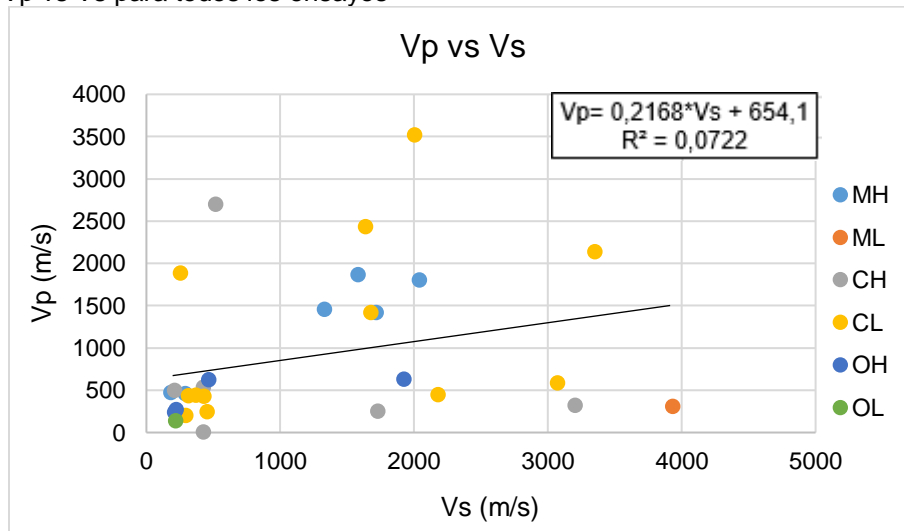
Autor

Al determinar la relación existente entre los valores de Vs y Vp obtenidos con el ensayo Bender Element se observa que solo un valor se acerca a la relación teórica de 1,87 y que los demás valores están bastante alejados de esta relación; incluso hay algunas relaciones menores de 1 indicando que la onda S es más rápida que la onda P, lo cual no puede ser posible teniendo en cuenta la manera en como estas ondas viajan al atravesar los materiales.

Al promediar todas las relaciones calculadas para cada uno de los ensayos, en las diferentes condiciones planteadas, se observa que la mayor proximidad al valor teórico se presenta en la en condición saturada y para la primera consolidación.

Para poder observar de manera general la relación V_p/V_s , se hace una curva de las velocidades determinadas para todos los ensayos realizados en condición natural, tal y como se muestra en la Figura 65.

Figura 65. V_p vs V_s para todos los ensayos



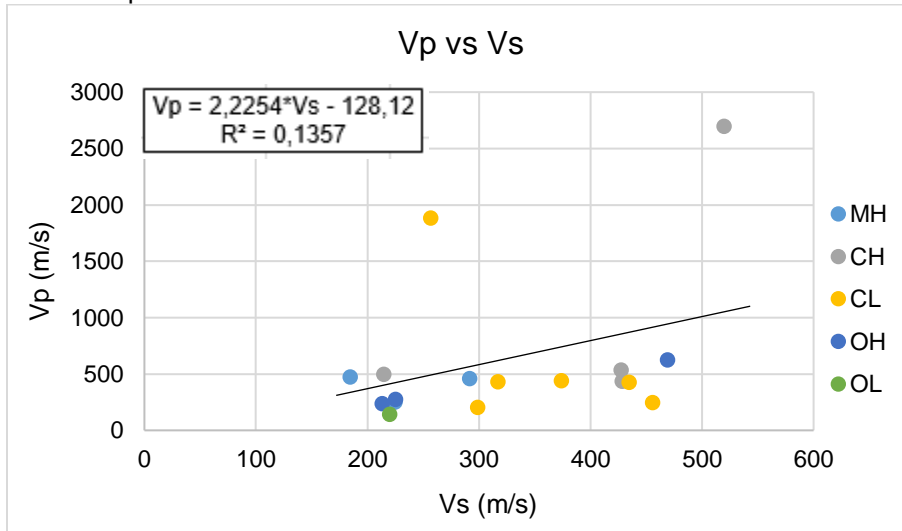
Autor

En la Figura 65 se puede observar para 16 de los 31 ensayos representados una gran dispersión de puntos, especialmente para las velocidades que están por encima de 1000 m/s. Para los ensayos restantes se observa una concentración de puntos más homogénea. Al determinar la ecuación que representa todas estas velocidades, se obtiene una relación V_p/V_s de 0,2168 la cual se aleja bastante al valor esperado ($V_p/V_s = 1,87$). El coeficiente de correlación R^2 es de 0,0722 el cual indica que la ecuación obtenida no es tan representativa debido a la gran dispersión de puntos que se tienen.

De acuerdo con lo observado en la Figura 65 se hace una nueva gráfica descartando aquellas velocidades que superan los 1000 m/s y que presentan la mayor dispersión, obteniendo la relación que se muestra en la Figura 66.

La dispersión de puntos es común para los diferentes materiales ensayados; ninguno muestra un comportamiento representativo a los mismos.

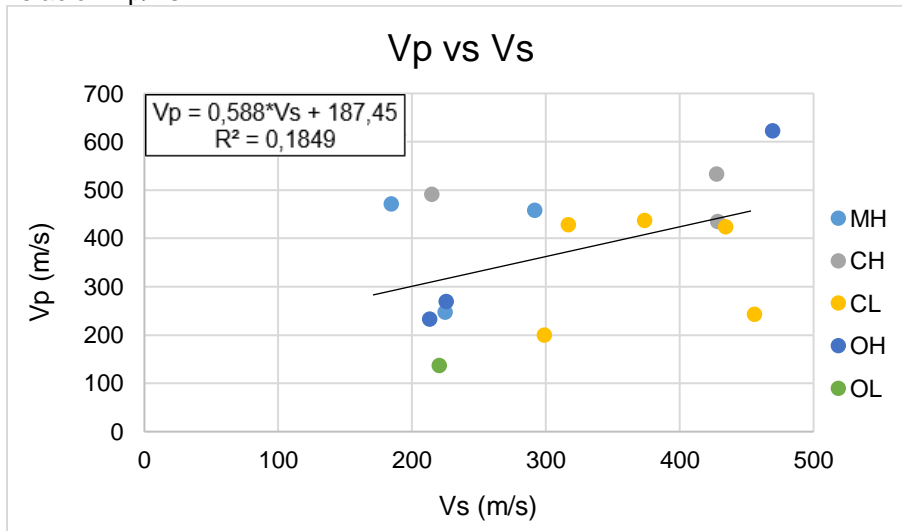
Figura 66. Relación Vp/Vs



Autor

En la figura 66 se obtiene una relación de correlación mayor a la mostrada en la figura 65, sin embargo se presentan dos puntos bastante alejados de los demás valores representados, por esta razón se eliminan generando la curva que se muestra en la figura 60. Para este caso la relación Vp/Vs es de 2,2254 la cual es más cercana al valor teórico de Vp/Vs=1,87.

Figura 67. Relación Vp/Vs

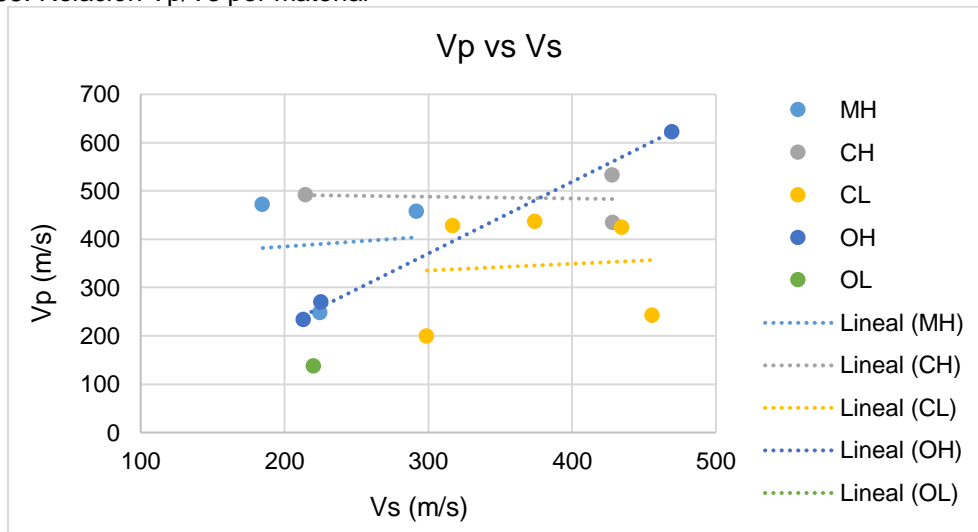


Autor

La Figura 67 muestra los valores de velocidad que menos dispersión presentan, sin embargo no existe una tendencia tan marcada entre ellos. Al determinar la ecuación que representa todos estos valores, se obtiene una relación $V_p/V_s=0,588$, valor que se sigue alejando del esperado; sin embargo el coeficiente de correlación aumenta a 0,1849, indicando que de las tres representaciones la mostrada en la Figura 64 es la que mejor se ajusta a los resultados obtenidos.

Al linealizar el comportamiento de V_p/V_s para cada material se obtiene la siguiente gráfica.

Figura 68. Relación V_p/V_s por material



Autor

En la figura 68 se observa para los limos de alta plasticidad (MH) y las arcillas de baja y alta plasticidad (CL y CH), pendientes muy pequeñas en comparación con el comportamiento de los suelos orgánicos de alta plasticidad.

Teniendo en cuenta que la velocidad de onda compresiva (V_p) viaja en la misma dirección de propagación de la onda y que la velocidad de onda cortante (V_s) viaja en sentido perpendicular a la dirección de propagación, V_p siempre será mayor que V_s . En la tabla 32 se muestra para todos los ensayos cuales cumplen esta condición.

Tabla 32. Verificación si Vp es mayor que Vs

Ensayo	Vp > Vs ?				
	Natural	Saturada	1 Consd.	2 Consd.	3 Consd.
1	NO	-	-	-	-
2	NO	SI	SI	SI	-
3	SI	SI	-	-	-
4	SI	SI	NO	-	-
5	-	-	-	-	-
6	SI	NO	NO	SI	-
7	SI	-	-	-	-
8	SI	SI	SI	-	-
9	SI	SI	SI	SI	NO
10	SI	NO	-	-	-
11	SI	SI	SI	-	-
12	SI	SI	-	-	-
13	SI	SI	SI	NO	SI
14	NO	NO	NO	NO	NO
15	SI	SI	NO	SI	NO
16	NO	SI	SI	NO	SI
17	NO	NO	SI	NO	NO
18	SI	SI	SI	SI	SI
19	SI	SI	SI	SI	SI
20	NO	SI	SI	SI	SI
21	NO	SI	SI	NO	SI
22	NO	SI	SI	NO	NO
23	NO	SI	NO	NO	-
24	SI	-	-	-	-
25	NO	NO	-	-	-
26	NO	SI	NO	SI	-
27	NO	NO	NO	NO	SI
28	SI	NO	-	-	-
29	SI	SI	SI	SI	SI
30	NO	SI	SI	NO	SI
31	SI	NO	-	-	-
32	NO	SI	SI	SI	SI

Autor

Según la Tabla 32 existen varios ensayos en donde no se cumple con a condición de que Vp sea mayor que Vs, esto de nuevo presenta información importante sobre la sensibilidad, variabilidad y veracidad de los resultados que pueden ser obtenidos mediante el ensayo Bender Element.

5.6 VALORES FINALES V_s

En la NSR – 10 [2] se encuentran valores promedio de V_s teniendo en cuenta el tipo de perfil al que corresponda el material que se esté estudiando. En la Tabla 33 se muestra la clasificación de perfiles de suelo junto con valores aproximados para V_s , a partir de esta información se validan los resultados obtenidos en esta investigación para la velocidad de onda cortante (V_s), descartando los valores que superan la velocidad de 760 m/s, valor máximo que puede llegar a presentar un suelo..

Tabla 33. Clasificación de los perfiles de suelo según NSR-10

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{V}_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s > $\bar{V}_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	760 m/s > $\bar{V}_s \geq 360$ m/s
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_u \geq 100$ kPa (≈ 1 kgf/cm ²)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	360 m/s > $\bar{V}_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$, o 100 kPa (≈ 1 kgf/cm ²) > $\bar{s}_u \geq 50$ kPa (≈ 0.5 kgf/cm ²)
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	180 m/s > \bar{V}_s
	perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	IP > 20 w $\geq 40\%$ 50 kPa (≈ 0.50 kgf/cm ²) > \bar{s}_u
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: F₁ — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F₂ — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F₃ — Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con Índice de Plasticidad IP > 75) F₄ — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 36 m)	

[2]

En la Tabla 34 se presentan los valores de V_s que serían válidos como producto de esta investigación.

Tabla 34. Valores definitivos Vs

Ensayo	Sitio	Sondeo	Muestra	Profundidad (m)	Vs (m/s) Natural
3	Hayuelos	2	7	4,0 a 4,5	184,861
4	Bomberos	2	3	1,5 a 2,0	214,961
6	Hayuelos	2	6	3,5 a 4,0	224,936
9	Bomberos	2	5	2,5 a 3,0	257,021
10	Bomberos	1	8	4,5 a 5,0	213,511
11	Bomberos	2	8	4,0 a 4,5	374,204
12	Bomberos	2	4	2,0 a 2,5	427,981
13	Hayuelos	1	11	6,0 a 6,5	291,903
14	Bomberos	1	7	3,5 a 4,0	220,446
15	Bomberos	1	2	1,0 a 1,5	428,554
18	Bomberos	1	8 V2	4,5 a 5,0	225,74
23	Hayuelos	1	10	5,0 a 5,5	434,787
24	Bomberos	2	12	6,0 a 6,5	520,264
27	Bomberos	1	4	2,0 a 2,5	455,973
28	Bomberos	2	11	5,5 a 6,0	317,202
31	Bomberos	3	6	3,5 a 4,0	469,625
32	Las Quintas	1	2	2,8 a 3,2	299,022

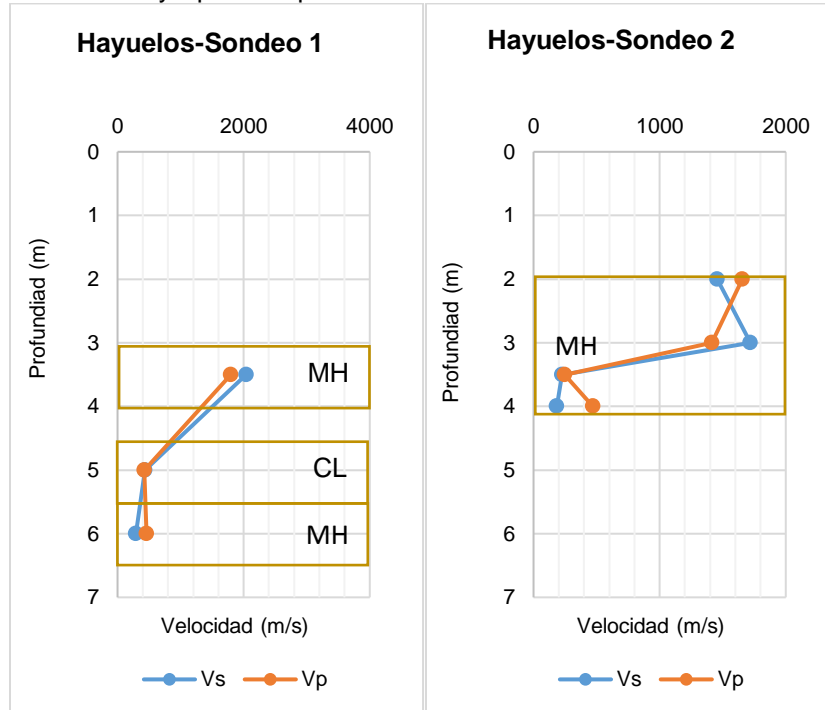
Autor

De los 32 ensayos realizados existe uno en donde no se tiene registro de velocidades ya que la muestra se dañó antes de hacer la primera medición, quedando solo 31 ensayos válidos, de los cuales solo 17 resultados de Vs en condición natural se encuentran dentro del rango permitido para un suelo, según la NSR 10; esto equivale a un porcentaje del 54,8 %. Este porcentaje es muy bajo ya que indica que casi la mitad de los ensayos no son válidos como resultado de la investigación debido a la gran incertidumbre que presenta el ensayo en cuanto a su procedimiento de instalación en el cual influyen varias condiciones externas, así como a la alta sensibilidad del mismo al verse afectado por cualquier ruido por muy pequeño que este sea.

5.7 VARIACIÓN DE LAS VELOCIDADES DE ONDA EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD

Con las muestras utilizadas para los ensayos Bender Element y que correspondían a un mismo sondeo fue posible realizar curvas de Vs y Vp en función de la profundidad, tal y como se muestra a continuación:

Figura 69. Variación de Vs y Vp con la profundidad - Sitio 1



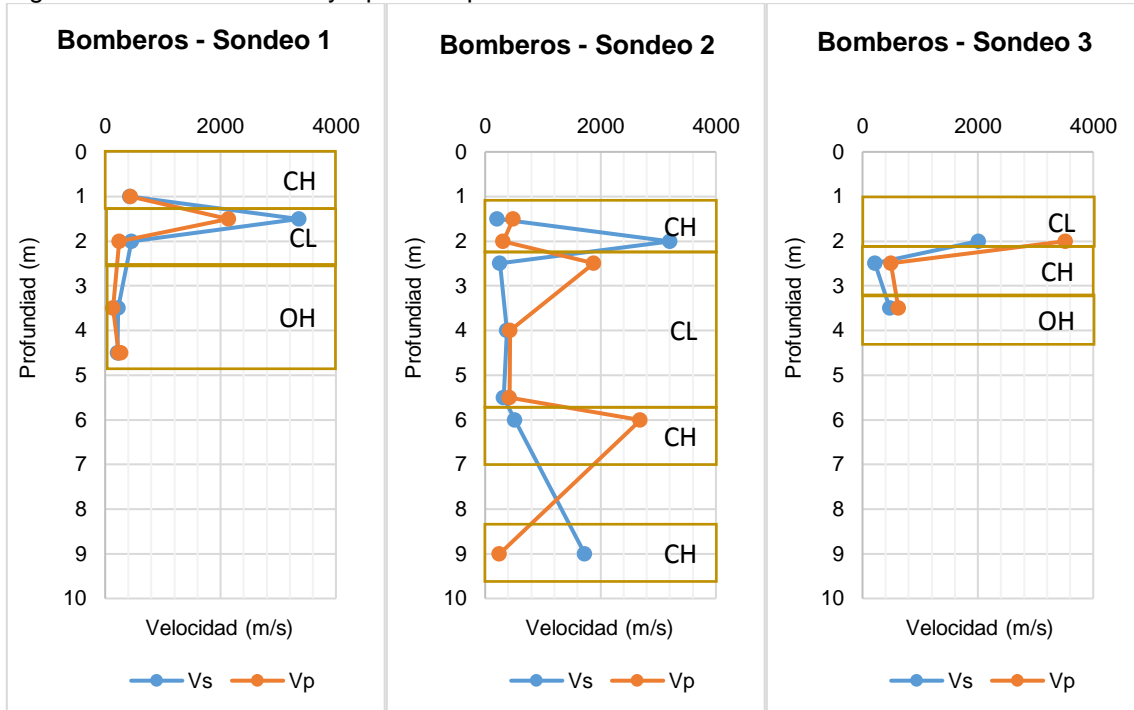
Autor

Para el sondeo 1 y 2 de Hayuelos no se encontró nivel freático.

En la Figura 70 se observa los cambios en los valores de Vs y Vp con la profundidad, los cambios en los valores de las velocidades representan cambios de material en el perfil de suelo.

Para el sondeo 2 de Hayuelos, después de los 3,5 m se observan valores de Vs similares, lo cual es coherente ya que no existe un cambio de material.

Figura 70. Variación de Vs y Vp con la profundidad - Sitio 1



Autor

En el sondeo 1 y 3 de Bomberos no se encontró nivel freático, para el sondeo 2 el nivel freático se situó a 9,5 m.

En la figura 71 se muestra la variación de Vs y Vp en función de la profundidad, para tres sondeos realizados en el sitio 2 (Bomberos). Allí es posible observar como los cambios en las velocidades de onda dependen principalmente del material que se esté analizando. A partir de ensayos de campo en donde es posible determinar la variación de las velocidades de onda a profundidad, también se identifican los cambios de material. En el perfil de velocidades representado se tienen cambios abruptos en los suelos en donde las velocidades, Vs, superan los 760 m/s.

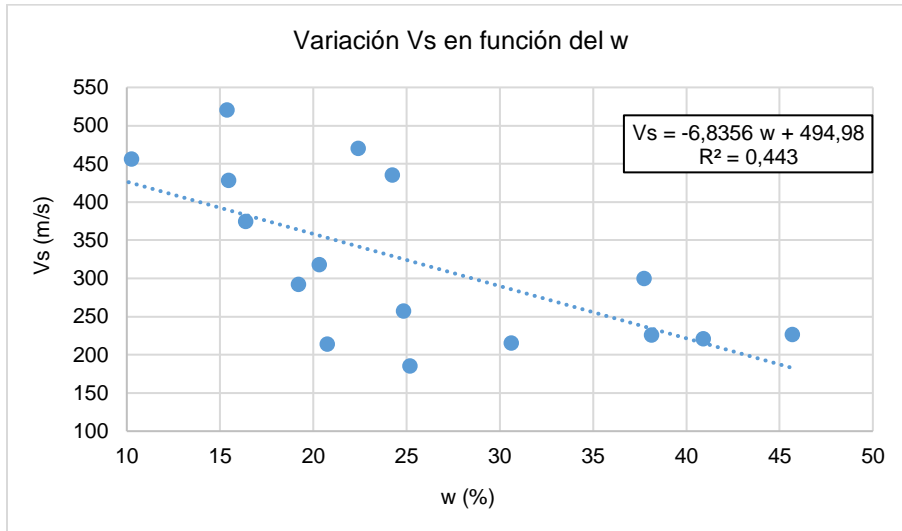
En el sondeo dos de bomberos, para una profundidad de 2,5 a 5,5 se presenta una capa de suelo clasificada según la USCS como CL, en donde los valores de Vs se mantienen casi constantes en toda la capa.

En los perfiles de velocidad se observan casos en donde los valores de Vs son mayores a los de Vp, condición que en la realidad no se puede presentar; lo anterior permitirá afirmar que algunos de estos valores no son válidos por esta condición.

5.8 VARIACIÓN DE V_s EN FUNCIÓN DE PROPIEDADES BÁSICAS

En las siguientes figuras se muestra la variación de V_s en función de la humedad, LL, LP e IP, para los ensayos Bender realizados en donde V_s no supera los 760 m/s.

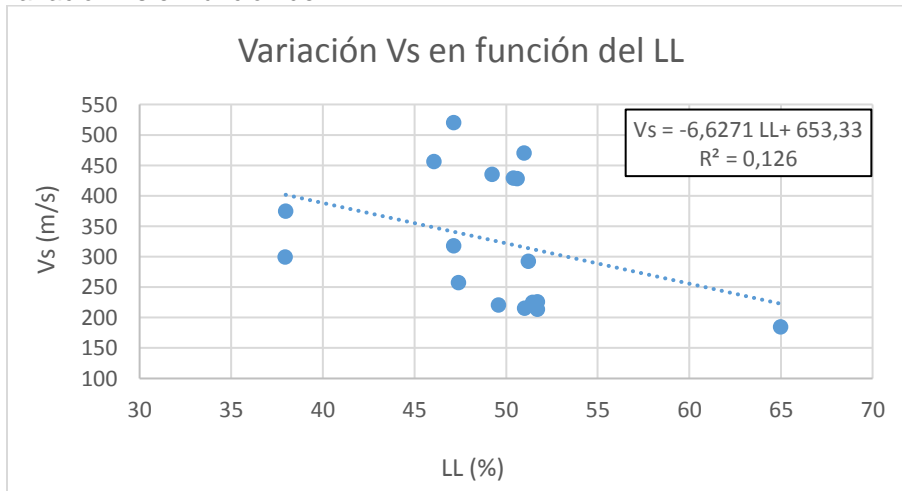
Figura 71. Variación V_s en función de w



Autor

En la Figura 72 es posible observar una tendencia decreciente, es decir que a mayor humedad en el suelo los valores de las velocidades de onda tienden a disminuir. A partir de la manera conceptual de cómo estas ondas se propagan en los materiales, tiene sentido esta afirmación ya que este tipo de ondas solo se propagan en medios sólidos. No es posible determinar una expresión matemática representativa de su comportamiento ya que como se puede observar debido a la dispersión que presentan los datos, el valor de correlación de la ecuación calculada es de 0,443.

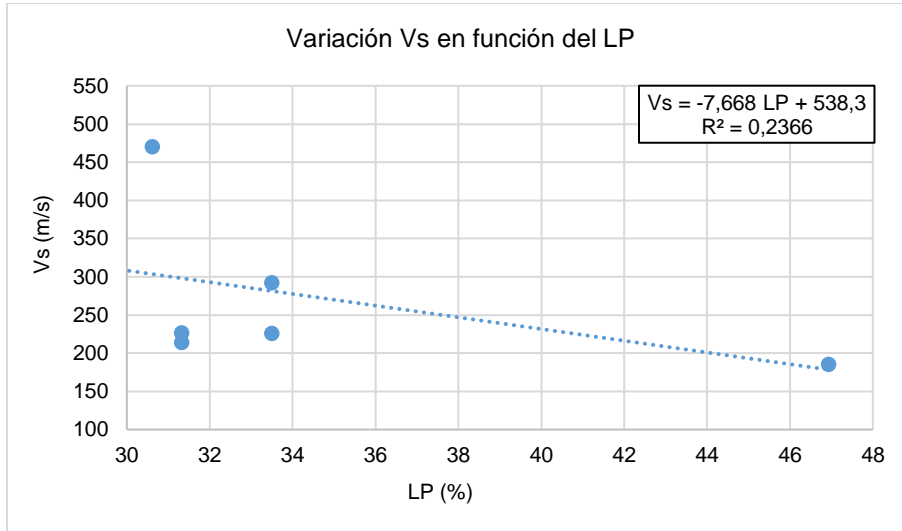
Figura 72. Variación V_s en función de LL



Autor

En la Figura 73 es posible observar como los valores de Vs presentan una tendencia decreciente en función del límite líquido. De igual manera se presenta gran dispersión de los datos en cuanto a los valores de Vs para cada límite líquido lo que impide poder obtener una ecuación apropiada para determinar su comportamiento. Al tratar de linealizar la gráfica se obtienen una ecuación con un valor de correlación de 0,126, indicando que la ecuación determinada no representa a todos los valores dibujados sino a aproximadamente el 10% de ellos.

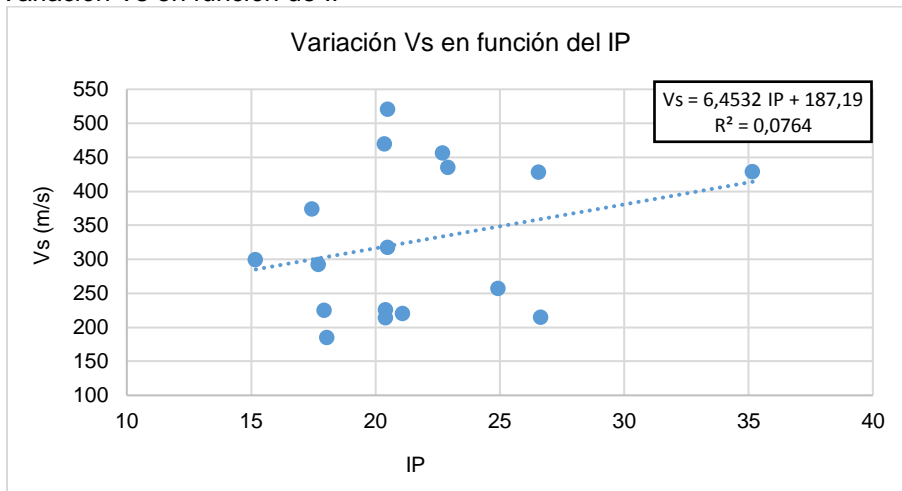
Figura 73. Variación Vs en función de LP



Autor

De acuerdo con la Figura 74 se puede afirmar que Vs disminuye al aumentar el límite plástico. Teniendo en cuenta la dispersión de los puntos representados, se puede decir que la línea de tendencia ajustada a su comportamiento no es tan representativa y esto se evidencia en el valor de correlación obtenido de 0,2366.

Figura 74. Variación Vs en función de IP

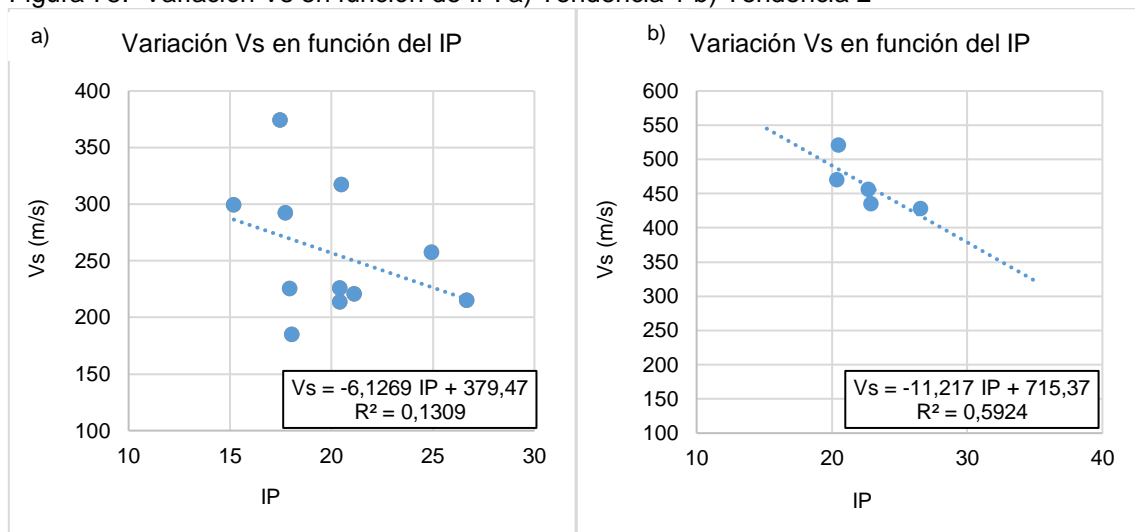


Autor

En la figura 75 se presentan los valores de V_s en función de IP, en donde es posible observar una agrupación de puntos hacia la parte superior y otra hacia la parte inferior con una tendencia decreciente. Al generar una línea de tendencia para todos los datos se obtienen una ecuación con un coeficiente de correlación demasiado pequeño, el cual indica que la ecuación no es representativa para los valores dibujados.

Para facilitar su interpretación se construyen dos graficas con cada una de las agrupaciones de puntos identificadas y se retira el punto correspondiente a $IP=35$, ya que se encuentra alejado de las dos tendencias observadas, obteniendo los resultados que se muestran a continuación:

Figura 75. Variación V_s en función de IP. a) Tendencia 1 b) Tendencia 2



Autor

En la figura 76 se presentan las dos tendencias identificadas para el comportamiento de la variación de V_s en función de IP. Tenido en cuenta el valor de R^2 , la tendencia dos es la que mejor representa el comportamiento de los valores encontrados, aunque solo en un 60%.

5.9 ANÁLISIS RESULTADOS ENSAYOS DINÁMICOS

En los valores de velocidades de onda (V_s y V_p) obtenidos mediante el ensayo Bender Element para diferentes muestras tomadas del depósito fluvio-lacustre de la ciudad de Tunja, es posible observar una alta variabilidad de los resultados la cual se atribuye principalmente a las diferentes variables externas que intervienen en la ejecución del ensayo.

Validando los resultados de V_s a partir de la NSR -10 se tiene que de 32 ensayos realizados, solo 17 son válidos, representando un poco más de la mitad de los ensayos. Se intentó de diferentes maneras identificar comportamientos en cuanto a la variación de V_s y V_p para diferentes tipos de suelos, sin embargo no se encontró ninguna tendencia representativa.

En la Tabla 22 en donde se presentan las propiedades dinámicas de las muestras ensayadas, calculadas a partir de los resultados de velocidades de onda obtenidos con el ensayo Bender Element, se observan valores negativos en la relación de Poisson para los casos en donde V_p/V_s es muy cercano a 1. Teniendo en cuenta que la onda P al atravesar los materiales lo hace de una manera más rápida, la relación V_p/V_s no podría ser menor de 1; sin embargo en la Tabla 22 se observa que en ciertos casos esto no se cumple, en consecuencia para estos ensayos el valor de la relación de Poisson no es válido.

En la Figura 44 se presenta la curva de amortiguamiento para las tres muestras en las cuales se realizó el ensayo triaxial; comparando su comportamiento con las curvas teóricas propuestas por Kramer [10], ver Figura 11, es posible observar que el primer ensayo (CL e IP=15) no es válido ya que su tendencia es opuesta. Para los dos ensayos restantes no se puede observar claramente la influencia del IP ya que presentan el mismo valor de IP, sin embargo las curvas no son iguales debido a q no son el mismo tipo de suelo.

La Figura 45 contiene la curva de reducción del módulo, para este caso los tres ensayos muestran el comportamiento similar al mostrado en la Figura 9. Al analizar el comportamiento de la gráfica en cuanto al índice de plasticidad es posible observar que para las arcillas de alta plasticidad, se presenta lo contrario a lo mostrado en la curva teórica propuesta por Kramer [10], ya que en la curva obtenida al disminuir el índice de plasticidad la curva se desplaza hacia la derecha.

Para el caso en el que el comportamiento de la curva muestra una tendencia totalmente diferente al comportamiento típico de un suelo, (ensayo 1) se podría considerar que no es un ensayo válido.

5.10 MAPA ZONIFICACIÓN

Con los resultados de V_s y V_p obtenidos por medio del ensayo Bender Element en esta investigación, junto con los valores de V_s tomados de la tesis de grado “*Estudio de Respuesta Dinámica del subsuelo en la ciudad de Tunja - Sector Norte*” [29] se realiza la localización geográfica de cada una de las muestras ensayadas en el software ArcGIS con el fin de poder presentar un mapa de zonificación dinámica.

En la tabla 35 se muestran los valores de V_s tomados de la tesis de maestría “*Estudio de Respuesta Dinámica del subsuelo en la ciudad de Tunja - Sector Norte*” [29], cabe aclarar que de todos los resultados que se presentan en esta investigación, sólo se tuvieron en cuenta las velocidades de onda cortante (V_s) halladas mediante el ensayo Bender Element. Estos valores se distribuyen geográficamente dentro de la ciudad de Tunja, de allí solo se tomaron los que estaban ubicados dentro del depósito fluvio-lacustre de la ciudad; como allí no se presentan valores de V_p , estos se determinan usando la relación $V_p=1,87 \cdot V_s$ y de igual manera se localizan y se tienen en cuenta para generar la zonificación correspondiente.

De los resultados de la presente investigación, para generar la zonificación sólo se tuvieron en cuenta aquellos ensayos en donde V_s en condición natural no superara los 760 m/s, y su correspondiente valor de V_p .

La zonificación del depósito fluvio-lacustre de la ciudad de Tunja se realizó por profundidades cada 0,5 m, obteniendo los resultados que se muestran en las figuras 77 y 78.

En la figura 78 se presenta la zonificación obtenida en función de V_s del depósito fluvio-lacustre de la ciudad de Tunja para diferentes profundidades, los intervalos de variación de V_p son los mismos que se utilizaron para V_s . De 1,0 m a 2,5 m se observa un comportamiento similar. De 2,5 m a 3,0 m y de 4,0 m a 4,5 m los valores de V_p son superiores a 600 m/s casi en todo el depósito.

La zonificación realizada para V_s y para V_p muestra que la zona más crítica se localiza en el centro del depósito, en donde las velocidades toman los valores más bajitos.

Es importante aclarar que la zonificación presentada corresponde a un resultado preliminar, debido a la poca dispersión de puntos con la que se contaba para su realización.

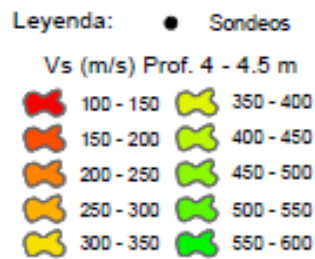
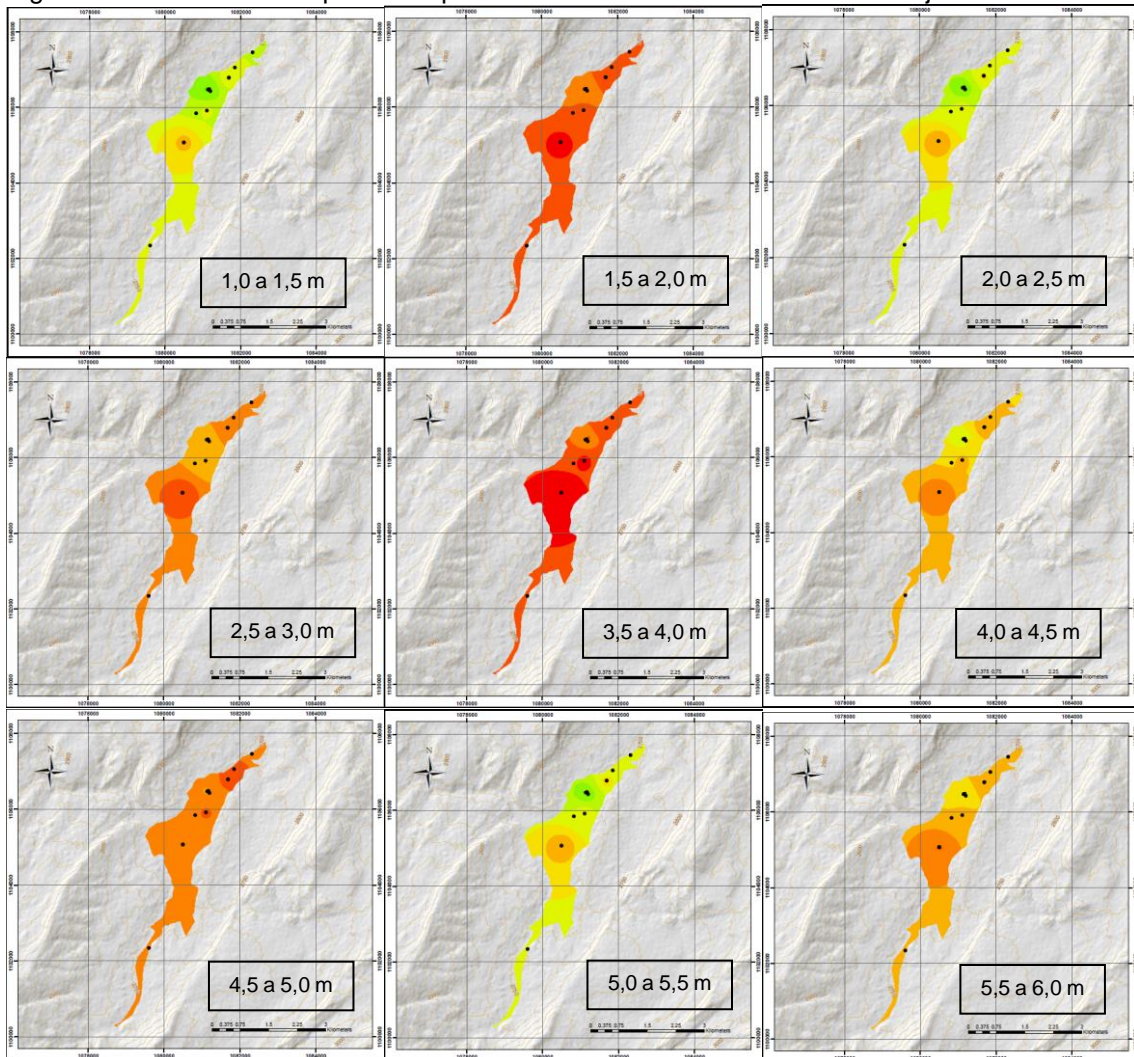
En la zonificación realizada para V_s se observa que la profundidad más crítica corresponde a la de 1,5 a 2,0 m y de 3,5 a 4,0 m. A medida que la profundidad va aumentando se tiene cambios en el comportamiento de V_s de manera gradual. Para las diferentes profundidades graficadas, a excepción de la de 4,5 a 5,0 m, se identifica que la zona que presenta menores velocidades en cada profundidad corresponde a la parte central del depósito, en donde su longitud transversal y espesor es más grande.

Tabla 35. Valores de Vs obtenidos en la Tesis “Estudio de Respuesta Dinámica del subsuelo en la ciudad de Tunja - Sector Norte”

Sondeo	Muestra	Profundidad (m)	Coordenadas		Barrio o Localidad	Peso unitario g/cm ³	Vs (m/s)	Módulo G (kgf/cm ²)	Descripción
			Norte	Este					
1	14	10,0 a 10,4	1.107.454	1.082.318	Colegio Gimnasio Campestre	2,29	394,36	3556	Arcilla arenosa de color gris
2	9	4,5 a 4,9	1.108.178	1.082.482	Alcalá Real	2,08	332,25	2295	Arcilla limosa de color amarillo con rojo
4	23	23,0 a 23,4	1.107.052	1.081.847	Colegio Cristo Rey	2,04	441,36	3982	Arcilla limosa de color gris
5	20	17,0 a 17,4	1.104.431	1.979.420	Hospital San Rafael	2,1	262,48	1449	Arcilla de color gris con morado, consistencia dura, estado seco
7	29	15,0 a 15,5	1.105.841	1.080.822	Las Quintas	2,1		2605	Arcilla arenosa de color gris, consistencia media a baja
						2,09	313,37	2052	
10	17	9,4 a 9,9	1.105.066	1.080.498	Mesopotamia	1,41		39	Limo orgánico con alto contenido de humedad
						1,47	248,82	912	
10	6	4,5 a 4,9	1.105.066	1.080.498	Mesopotamia	1,7		792	Arcilla de color gris claro, consistencia media, plasticidad alta
						1,7	220,39	825	
11	16	16,0 a 16,4	1.103.734	1.079.850	Universidad Antonio Nariño	2,1	260,56	1425	Arcilla de color amarillo, consistencia firme
12	9	4,5 a 5,0	1.104.379	1.081.200	Aeropuerto	2,02	432,92	3783	Limo de color gris con amarillo, consistencia firme, estado seco
15	13	8,0 a 8,4	1.102.268	1.080.327	Xiativilla	1,54	310,66	1486	-
16	15	11,0 a 11,4	1.102.342	1.079.604	Bochica	1,52	338,66	1749	Arcilla limosa de color gris verdoso, consistencia firme.
17	15	13,0 a 13,4	1.101.785	1.078.483	Surinama	2,24	367,41	3018	-

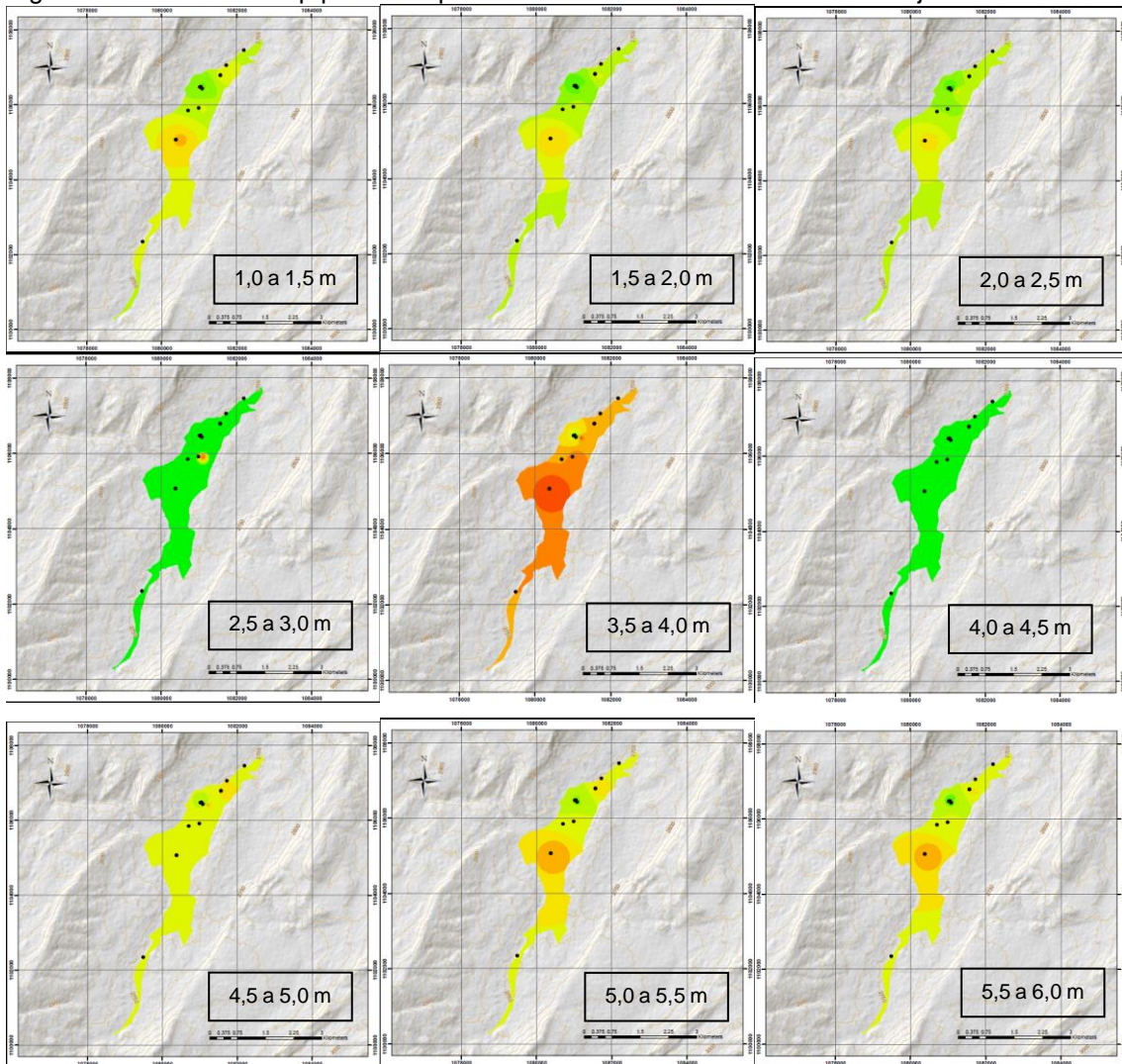
[29]

Figura 76. Zonificación Vs para el depósito fluvio-lacustre de la ciudad de Tunja



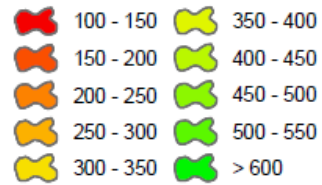
Autor

Figura 77. Zonificación Vp para el depósito fluvio-lacustre de la ciudad de Tunja



Leyenda: ● Sondeos

Vp (m/s) Prof. 3.5 - 4 m



Autor

6. CONCLUSIONES

- Por medio del ensayo Bender Element fue posible determinar parámetros dinámicos de los suelos que componen el depósito fluvio-lacustre de la ciudad de Tunja; sin embargo algunas velocidades halladas con este ensayo no se pudieron tener en cuenta ya que superaban el valor máximo de V_s que puede presentar un suelo de acuerdo con la NSR 10 ($V_s < 760$ m/s).
- El ensayo Bender Element resulta ser un ensayo de fácil ejecución, sin embargo, presenta la intervención de diferentes variables que influyen en sus resultados como lo son: la precisión en el tamaño del orificio en donde se debe insertar el elemento Bender, la cual se ve influenciada en gran medida por el tipo de suelo, ya que en suelos con altos contenidos de agua estos se volvían más plásticos y cada vez que se intentaba generar el orificio este se deformaba, también cuando la muestra estaba muy seca la muestra se rompía y el orificio se dañaba; la segunda variable es poder garantizar la total alineación de los elementos Bender dentro de la muestra.
- En los ensayos realizados se observó que cualquier ruido por pequeño que fuera, generaba una afectación en las señales medidas ocasionando variaciones en cada una de las mediciones. Esto se veía reflejado con el paso de vehículos o fuentes externas de ruido que alcanzaban a ser sentidas por el equipo. Al realizar varias mediciones sobre una misma muestra en las mismas condiciones, no se obtenían señales totalmente iguales.
- La alta sensibilidad del ensayo y las diferentes variables que influyen en el mismo, produjo que sólo un poco más de la mitad de los ensayos tuvieran resultados válidos, los demás presentaron valores de V_s muy altos y debieron descartarse. De 32 ensayos realizados solo 17 fueron válidos.
- En esta investigación al plantear el ensayo en cuatro condiciones adicionales a la condición natural, se generaba que el ensayo se tomara aproximadamente cuatro días por muestra en su ejecución, en donde la extensión del tiempo no dependía de la duración del ensayo Bender sino de poder generar cada una las condiciones propuestas. Esto extendió un poco más el tiempo planeado para la ejecución de los ensayos.
- Se realizaron curvas que permitieran observar la variación de las velocidades en función de las propiedades básicas de cada muestra, la condición del ensayo y la profundidad, para poder observar si existía algún tipo de comportamiento determinado por estas condiciones, sin embargo en todos los análisis la gran variabilidad de los resultados no permitió identificar un comportamiento en común.

- A partir de los valores de velocidades de onda obtenidos, se genera una zonificación del depósito fluvio lacustre de la ciudad de Tunja en función de V_s y V_p . El análisis se hizo para diferentes profundidades y tiene como limitación la poca dispersión de los puntos representados.
- El ensayo Bender Element es un ensayo que presenta una alta incertidumbre de sus resultados debido a la gran cantidad de variables que intervienen en él, por esta razón no se recomienda como un ensayo determinístico para generar una zonificación y si como complemento a otras técnicas o ensayos de laboratorio, ya que como ventaja tiene su fácil ejecución.
- De acuerdo con la zonificación sísmica realizada para V_s se observa que las velocidades más bajas se localizan hacia el centro del depósito, mostrando que en esta zona es donde podrían generarse mayores procesos de amplificación de onda.
- El índice de Plasticidad es un factor determinante en el comportamiento dinámico de un suelo, ya que a mayor índice de plasticidad las velocidades de onda, V_s , tienden a disminuir. A pesar de la dispersión de los resultados en las gráficas realizadas para V_s en función de IP, es posible identificar este comportamiento.
- Al plantear el ensayo Bender Element en condición saturada y en tres valores diferentes de confinamiento, se esperaba observar un aumento progresivo de V_s y V_p a medida que el suelo se fuera densificando, sin embargo a causa de la sensibilidad del ensayo que ocasiono valores de V_s muy elevados, este comportamiento no se pudo observar en los ensayos realizados.
- Teniendo en cuenta el procedimiento de ejecución del Ensayo Bender Element, resulta ser un ensayo de fácil utilización que brinda valores de V_s y V_p para cualquier suelo fino; sin embargo es importante poder controlar las variables que intervienen en sus resultados.

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda nuevos estudios enfocados a la caracterización dinámica del depósito fluvio-lacustre de la ciudad de Tunja, no solo con ensayos Bender, sino complementado con ensayos triaxiales y columnas resonantes, ya que estos últimos no presentan tanta incertidumbre y variabilidad en los resultados como en el caso del ensayo Bender Element.
- Teniendo en cuenta la variabilidad de los suelos presentes en el depósito fluvio-lacustre, así como sus espesores, se recomienda realizar ensayos dinámicos de campo que permitan conocer la distribución de los materiales en campo y sus propiedades dinámicas.
- Para mejorar la zonificación sísmica obtenida en esta investigación se necesita una mayor dispersión de puntos, para lo cual se recomienda complementar la información existente con ensayos de campo, ya que un gran porcentaje del área del depósito se encuentra construida y no es posible la obtención de muestras para la realización de ensayos de laboratorio, y en los casos en donde sí se puedan realizar sondeos y la extracción de muestras, se sugiere que no sólo se trabaje con ensayos Bender Element, sino que también se tengan en cuenta otros ensayos como el triaxial cíclico o la columna resonante.
- A partir de la alta variabilidad en los resultados del ensayo Bender Element y su gran sensibilidad en el momento de ejecutarlos se recomienda realizar una zonificación dinámica empleando otro método de ensayo para la obtención de los parámetros dinámicos.
- Realizar más investigaciones enfocadas a la ejecución del ensayo Bender Element que permitan identificar procedimientos que ayuden a mejorar la sensibilidad del ensayo y así obtener resultados más confiables.
- Hacer más investigaciones en donde los ensayos Bender Element se realicen con otros equipos a nivel nacional diferentes al de la UPTC, para poder comparar sus resultados, identificar de manera más precisa que variables afectan el ensayo y posibles opciones para mejorar tanto su ejecución como su precisión.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] DIAN, “Resultados y Proyecciones (2005 - 2020) del Censo 2006.”
- [2] S. C. de I. SCI, “Nsr-10,” in *NSR - 10*, vol. A, 2010, p. 186.
- [3] J. J. Guacaneme Berbeo, “Zonificación de suelos en superficie de la ciudad de Tunja, Colombia,” *Rev. Épsilon*, pp. 37–38, 2006.
- [4] “Localización del municipio de tunja en el departamento.” [Online]. Available: http://www.tunja-boyaca.gov.co/mapas_municipio.shtml?apc=bcxx-1-&x=992.
- [5] “Localización del municipio de Tunja en el país.” [Online]. Available: http://www.tunja-boyaca.gov.co/mapas_municipio.shtml?apc=bcxx-1-&x=986.
- [6] “P02 - Mapa Geología - Diagnóstico.” [Online]. Available: http://tunja-boyaca.gov.co/apc-aa-files/30306336653731623764356264663261/p02-mapa_geologia1.pdf.
- [7] M. Tsige and I. García Florez, “Propuesta de clasificación geotécnica del ‘Efecto Sitio’ (Amplificación Sísmica) de las formaciones geológicas de la Región de Murcia,” *Geogaceta*, no. 40, pp. 39–42, 2006.
- [8] F. Sauter, *Fundamentos de Ingeniería Sísmica I: Introducción a la sismología*. Editorial Tecnológica de Costa Rica, 1989.
- [9] E. J. Tarbuck, F. K. Lutgens, D. Tasa, AMR traducciones científicas, T. E. J, and F. K. Lutgens, *Ciencias de la tierra una introducción a la geología física*. 2005.
- [10] S. L. Kramer, *Geotechnical Earthquake Engineering*. 1996.
- [11] J. A. Díaz-Rodríguez, “Caracterización dinámica de los suelos - Ensayos de campo y laboratorio,” *Curso en Ing. Sísmica y Dinámica Suelos*, p. 70, 2013.
- [12] A. H. Hammam and M. Eliwa, “Comparison between results of dynamic & static moduli of soil determined by different methods,” *HBRC J.*, vol. 9, no. 2, pp. 144–149, 2013.
- [13] J.-S. Lee and J. C. Santamarina, “Bender Elements: Performance and Signal Interpretation,” *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 131, no. 9, pp. 1063–1070, 2005.
- [14] J. K. Ā and B. N. Madhusudhan, “A note on the measurement of travel times using bender and extender elements,” *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 30, no. 7, pp. 630–634, 2010.
- [15] J. . Camacho-Tauta, J. D. Álvarez-Jiménez, and O. J. Reyes-Ortiz, “A procedure to calibrate and perform the bender element test,” *Dyna rev.fac.nac.minas*, vol. 79, no. 176, pp. 10–18, 2012.

- [16] C. Ferreira, J. P. Martins, and A. Gomez, "Determination of the Small-Strain Stiffness of Hard Soils by Means of Bender Elements and Accelerometers," *Geotech Geol Eng*, vol. 6, 2013.
- [17] X. Gu, J. Yang, and M. Huang, "Laboratory measurements of small strain properties of dry sands by bender element," *Soils Found.*, vol. 53, no. 5, pp. 735–745, 2013.
- [18] C. Ferreira, A. Viana de Fonseca, and J. A. Santos, "Comparison of simultaneous Bender Elements and Resonant Column Tests on Porto Residual Soil," pp. 1–12.
- [19] J. Camacho-Tauta, J. Jiménez, and O. Reyes-Ortiz, "Comparison between Resonant - Column and Bender Element tests on three types of soils," no. 1, pp. 163–172, 2013.
- [20] X. Gu, J. Yang, M. Huang, and G. Gao, "Bender element tests in dry and saturated sand: Signal interpretation and result comparison," *Soils Found.*, vol. 55, no. 5, pp. 951–962, 2015.
- [21] Y. Cai, Q. Dong, J. Wang, C. Gu, and C. Xu, "Measurement of small strain shear modulus of clean and natural sands in saturated condition using bender element test," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 76, pp. 100–110, 2015.
- [22] T. Kim, D. G. Zapata-Medina, and C. A. Vega-Posada, "Analysis of Bender Element signals during triaxial testing," *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, no. 76, pp. 107–113, 2015.
- [23] T. Ogino, T. Kawaguchi, S. Yamashita, and S. Kawajiri, "Measurement deviations for shear wave velocity of bender element test using time domain , cross-correlation , and frequency domain approaches," *Soils Found.*, vol. 55, no. 2, pp. 329–342, 2015.
- [24] X. Kang, G.-C. Kang, and B. Bate, "Measurement of Stiffness Anisotropy in Kaolinite Using Bender Element Tests in A Floating Wall Consolidometer," no. September, 2014.
- [25] E. Rodríguez, M. Sánchez, and C. Sainea, "Metodología para la respuesta dinámica del subsuelo en la Microzonificación sísmica de la ciudad de Tunja Methodology for the dynamic subsoil response in the seismic microzonation of Tunja city."
- [26] A. Gómez and C. Tovar, "Prototipo de Sistema de Información Geográfica con Software especializado. Microzonificación Sísmica Tunja," UPTC, 2014.
- [27] L. Guio, F. Reyes, M. Sanchez, and O. Jimenez, "Proyecto de Caracterización Dinámica del Subsuelo Para la Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Tunja," pp. 2995–3002, 2015.

- [28] R. Orozco and O. Jiménez, “Proyecto de caracterización dinámica del subsuelo para la microzonificación sísmica de la ciudad de Tunja,” pp. 105–113, 2014.
- [29] M. Sánchez, “Estudio de Respuesta Dinámica del subsuelo en la ciudad de Tunja - Sector Norte,” UPTC, 2016.

ANEXO A. ENSAYOS BENDER ELEMENT (DIGITAL)

ANEXO B. ENSAYOS TRIAXIALES (DIGITAL)

ANEXO C. PROPIEDADES BÁSICAS (DIGITAL)

ANEXO D. ANÁLISIS DE RESULTADOS (DIGITAL)

ANEXO E. ZONIFICACIÓN (DIGITAL)