



Obtención de propiedades mecánicas a partir de la relación V_p/V_s para depósitos superficiales de ceniza volcánica en Manizales Colombia

Obtaining mechanical properties from V_p/V_s ratio of superficial volcanic ash soils in Manizales city Colombia

ARISTIZÁBAL ARIAS, Jorge A. [1](#); MENDOZA ALFONSO, Néstor A. [2](#)

Recibido: 10/02/2017 • Aprobado: 12/03/2017

Conteúdo

- [1. Introdução](#)
 - [2. Marco teórico](#)
 - [3. Metodología](#)
 - [4. Análisis de resultados](#)
 - [5. Conclusiones](#)
- [Referencias](#)

RESUMO:

La gestión del riesgo de desastres asociada a la estabilidad de taludes en la ciudad de Manizales ocupa gran parte de los recursos de la administración municipal, por ello, ahondar en el conocimiento de cómo se comportan los depósitos de ceniza volcánica proporcionará algunas herramientas para dicha gestión. A continuación se presentan correlaciones que permiten obtener propiedades mecánicas a partir de la relación V_p/V_s para dar respuesta oportuna a los problemas de estabilidad que puedan afectar a una comunidad u obras de infraestructura.

Palabras clave: Gestión del riesgo, parámetros de resistencia, velocidad de onda, cenizas volcánicas.

ABSTRACT:

Disaster risk management associated with slope stability in Manizales city has incurred significant public expenses. A broader knowledge and understanding of the physical properties of volcanic ash soils would provide some tools for this management. Below are the correlations to obtain resistance parameters from V_p/V_s ratio, allowing one to promptly establish its characteristic properties and provide a timely response to stability problems that can affect a community or an infrastructure.

Keywords: Risk management, resistance parameters, wave velocity, volcanic ash soil.

1. Introdução

Los centros poblados de la región Andina colombiana están permanentemente expuestos a fenómenos de remoción en masa, producto de las condiciones geológicas, hidrológicas,

topográficas y antrópicas. Adicionalmente, las erupciones de los domos volcánicos como el complejo Ruiz – Tolima en el centro occidente del país hacen que los depósitos predominantes en superficie sean de ceniza volcánica; en el caso particular de la ciudad de Manizales estos materiales son los de mayor relevancia en los fenómenos de inestabilidad.

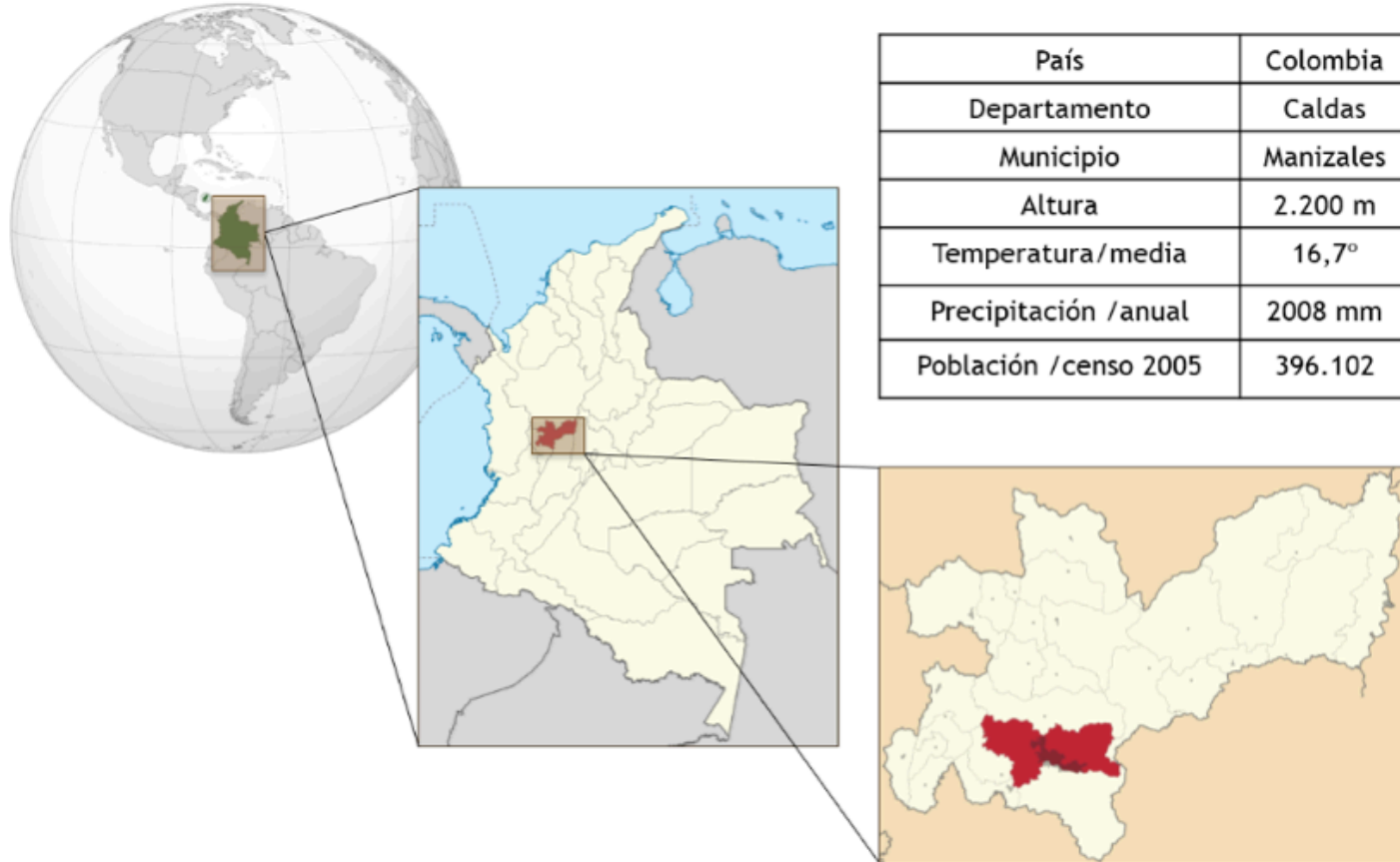
Las estadísticas oficiales de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres - Colombia (UNGRD, 2016) indican que en la región Andina, particularmente en la capital Caldense, los *deslizamientos* son el tipo de evento que mayor número de muertes y afectación a personas ha generado en los últimos 20 años; dicha afectación obedece a factores de origen natural y antrópico que se interrelacionan, en ellos se destacan, la topografía abrupta, el componente geológico representado en la sismicidad y origen de los depósitos, el componente hidrológico explicado en los intensos y prolongados períodos de lluvia, la deficiente planificación urbana y las malas prácticas constructivas.

El análisis de estabilidad de taludes y el diseño de estructuras de contención requieren conocer las propiedades mecánicas del suelo (cohesión, fricción y resistencia a la compresión); la obtención de estas demanda un tiempo importante debido a que los ensayos de laboratorio en el mejor de los casos toman una semana, sin embargo, la ejecución de ensayos geofísicos tales como líneas de refracción sísmica y la obtención de sus resultados se realiza en un día, no obstante los parámetros obtenidos en estos ensayos geofísicos hoy se limitan a la determinación de espesores del material y clasificación del perfil del suelo, de modo que correlacionar las propiedades mecánicas del suelo con los resultados de los ensayos de refracción sísmica permitiría conocer dichas propiedades de forma rápida y económica, atendiendo de manera oportuna el análisis de estabilidad, la evaluación de amenaza y el diseño de estructuras de contención mejorando la gestión del riesgo de taludes, más aun cuando en la ciudad de Manizales se presentan recurrentemente lluvias prolongadas e intensas que generan gran cantidad de eventos (movimientos en masa) simultáneamente, superando la capacidad de respuesta de los organismos gubernamentales y de los grupos consultores.

1.1. Características Geográficas

Los depósitos de cenizas volcánicas estudiados se ubican en la región Andina colombiana específicamente en la ciudad de Manizales capital del departamento de Caldas; esta se sitúa en el flanco occidental de la cordillera Central a una altura de 2.150 m.s.n.m. (IGAC, 2014) y a una distancia en línea recta menor a 30 km del complejo volcánico del Ruiz; su proximidad al complejo hace que presente como formación superficial dominante los depósitos de ceniza volcánica producto de múltiples erupciones a través del tiempo, que incluso actualmente son recurrentes dado que el complejo volcánico Ruiz – Tolima aun es activo (Aguirre Montoya, Ballesteros Botero, Gutiérrez Arboleda, & Montoya García, 1992); la dinámica permanente del complejo volcánico hace que la columna de depósitos de caída piroclástica alcance en algunos sectores un espesor de 50 m (Universidad de los Andes, 2001).

Figura 1. Localización del estudio



Fuente: Elaboración propia con soporte en IGAC (2014), Shadowxfox (2011,2012) y Addicted04 (2014)

2. Marco teórico

2.1. Depósitos de ceniza volcánica

Los depósitos de ceniza volcánica se pueden definir como suelos residuales derivados de materiales volcánicos con densidades bajas, humedad alta y presencia de minerales de aloysita (Suárez Díaz, 1998), además presentan propiedades especiales e inusuales si se comparan con los suelos sedimentarios convencionales (Wesley, 2010). Los depósitos de la ciudad de Manizales están compuestos por una serie de "fragmentos rotos de pómez y escoria de composición dacítica, así como de fragmentos de rocas (dacitas y andesitas porfídicas) de diferente tamaño que forman niveles de ceniza y lapilli" (Naranjo & Ríos, 1989).

En estos depósitos presentes en la capital caldense se pueden distinguir dos estados del suelo: inconsolidado y consolidado; el primero está compuesto por paquetes de arena volcánica cuyo espesor puede alcanzar de 10 a 50 cm, sobre este depósito descansan paquetes de materiales como ceniza con lapilli, ceniza arenosa y lapilli; el espesor promedio de esta primera unidad en la ciudad varía entre 10 y 15 m, estas cenizas muestran tonalidades de gris, amarillo, café e incluso color rojizo donde se evidencian niveles de oxidación producto del nivel freático, adicionalmente la composición principal de estos estratos son los anfíboles, feldespatos, cuarzo, pómez y líticos; por su condición de inconsolidados son potencialmente inestables si se localizan sobre laderas de pendiente media o pronunciada y específicamente si no existe una cobertura vegetal adecuada. El segundo estado del suelo denominado toba se localiza infrayaciendo el estado inconsolidado, sus espesores pueden alcanzar los 10 m y se profundizan hasta alcanzar el contacto con las unidades geológicas presentes en la ciudad como lo son las rocas de la formación Quebradagrande, los flujos volcánicos Casabianca y Manizales o las unidades ígneas. La textura de esta unidad es limoarenosa y los colores varían entre café oscuro y claro, gris verdoso y oscuro, y amarillo grisáceo, además, dentro de estos depósitos piroclásticos se pueden detectar niveles de paleosuelos que insinúan la inactividad volcánica entre eventos y su espesor varía entre 1 y 2 m (Aguirre Montoya et al., 1992).

Es característica en la ciudad de Manizales la presencia de contactos litológicos entre depósitos de ceniza volcánica superficial y rocas de la formación Quebradagrande o depósitos fluvio-torrenciales como la formación Casabianca (*Imagen 1*). La *Imagen 2* muestra un

deslizamiento de magnitud apreciable donde el espesor del depósito de ceniza volcánica es cercano a los 10 m; en el *Mapa 1* se aprecia que los depósitos de tipo Qcp [Depósitos de lluvia piroclástica; cenizas y lapilli de composición ácida que cubren las demás unidades a manera de sabana y siguiendo la topografía (Naranjo & Ríos, 1989).] son predominantes en la ciudad, con una ocupación del 44,41% en el área urbana (POT Manizales, 2007).

Imagen 1 . Contacto litológico, Avenida Marcelino Palacio



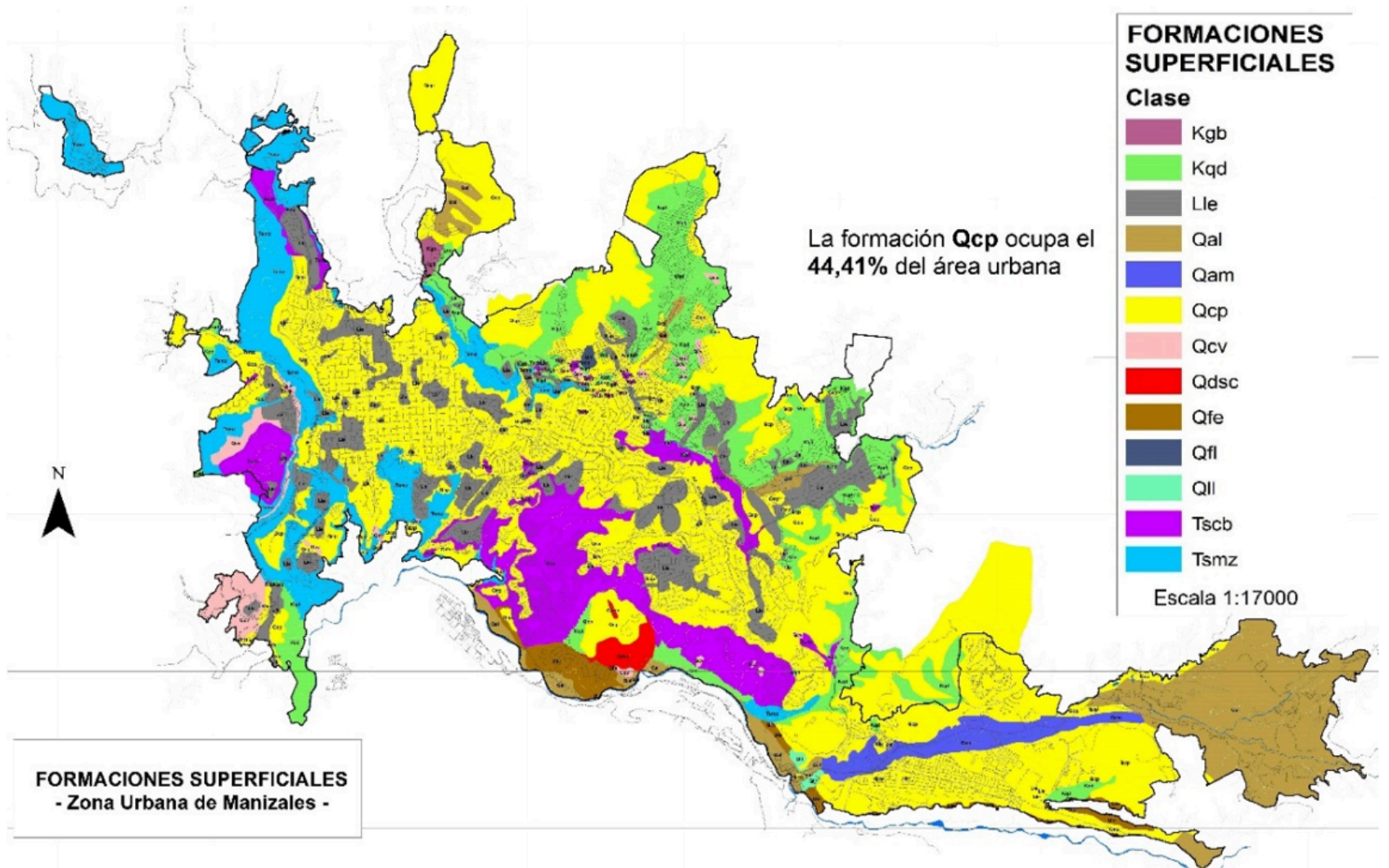
Fuente: Propia (2017)

Imagen 2 . Deslizamiento en la vía antigua a La Cabaña, Manizales



Fuente: Propia (2016)

Mapa 1 . Formaciones superficiales de la zona urbana de Manizales



2.2. Propiedades mecánicas del suelo

2.2.1. Resistencia a la compresión inconfiada

Peck y otros (Peck, Hanson, & Thornburn, 1993) indican que la consistencia de un suelo fino en condiciones inalteradas puede ser evaluada en función de la resistencia a la compresión inconfiada ensayando una muestra de suelo cuya altura esté cercana a 2 veces el diámetro, sometiéndola a una carga que garantice que la muestra falle o que alcance el 20% de la deformación unitaria (al no presentar falla) siendo relevante la rapidez con la que se debe realizar el ensayo para garantizar que la pérdida de humedad no represente cambios significativos. Durante el ensayo se toma el registro de la deformación vertical para cada incremento de carga hasta la falla, luego se procede a realizar la gráfica esfuerzo deformación, el valor de la resistencia a la compresión inconfiada se determina leyendo en la gráfica el máximo esfuerzo que produce la falla.

En la *Tabla 1* se presentan los valores máximo, mínimo y promedio de la resistencia a la compresión inconfiada q_u de un total de 376 ensayos de laboratorio de los depósitos de ceniza volcánica de la ciudad de Manizales.

Tabla 1 . Valores de la resistencia a la compresión inconfiada q_u para cenizas volcánicas en Manizales

Propiedad	Valor máximo	Valor mínimo	Promedio
Resistencia a la compresión inconfiada q_u (kg/cm ²)	3,45	0,20	1,13

Fuente: Elaboración propia con soporte en curadurías urbanas I y II de Manizales

2.2.2. Resistencia al corte

Juárez y Rico (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 1996) señalan que el primero en tratar el fenómeno de la resistencia de los suelos fue *C.A. Coulomb* en 1776, quien identificó que los suelos fallaban por efectos del esfuerzo cortante en planos de falla, estableciendo la denominada ley de resistencia al corte [*ecuación (2.1)*] en la que el esfuerzo cortante calculado τ depende del esfuerzo normal actuante σ y del ángulo de fricción del suelo φ .

$$\tau = \sigma \cdot \tan \varphi \quad (2.1)$$

De igual manera *Coulomb* observó que la resistencia al corte de los suelos variaba dependiendo del tipo de material, incluyendo el parámetro de resistencia c denominado cohesión, característico de las arcillas [*ecuación (2.2)*].

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (2.2)$$

Según Berry y Reid (Berry & Reid, 1993) la resistencia al corte del suelo depende de los esfuerzos efectivos. La determinación de estos parámetros de resistencia puede hacerse mediante ensayos de corte directo convencionales o a partir de ensayos triaxiales estáticos de compresión, si se realizan ensayos de corte directo no consolidado no drenado (UU) se emplean varias muestras de suelo similares, las cuales son sometidas a diferentes esfuerzos normales obteniéndose los valores de esfuerzo cortante correspondiente; una vez se tienen las parejas de esfuerzos se hace la gráfica de los datos y se obtienen los parámetros de resistencia cohesión y fricción.

Según Wesley (Wesley, 2010) los valores del ángulo de fricción para los suelos de ceniza

volcánica están en un rango de 25 – 35° alcanzando los 40° en algunas arcillas alófanas y aloisitas, y la cohesión efectiva toma valores entre 15-20 kPa. Para el caso particular de las cenizas volcánicas en zonas cafeteras de Caldas, Quindío y Tolima los valores de cohesión varían según Medina y Salazar (Medina López & Salazar Gutiérrez, 2009) entre 10,8 kPa a 54,2 kPa y el ángulo de fricción toma valores entre 18 y 31 grados. Los valores característicos de estas propiedades para el caso particular de los suelos en Manizales (a partir de 89 ensayos de corte UU) se muestran en la *Tabla 2*.

Tabla 2 . Valores del ángulo de fricción y cohesión para cenizas volcánicas en Manizales

Propiedad	Valor máximo	Valor mínimo	Promedio
Ángulo de fricción, ϕ (°)	69,3	15,37	29,03
Cohesión, c (kg/cm ²)	1,1	0,1	0,46

Fuente: Elaboración propia con soporte en curadurías urbanas I y II de Manizales

2.3. Propiedades dinámicas del suelo

2.3.1. Velocidad de onda

Sarria (Sarria, 1995) indica que el movimiento de las placas tectónicas lleva a un almacenamiento de energía en los contornos de estas, esta energía se acumula y posteriormente se libera produciendo los sismos, cuya magnitud según Díaz Rodríguez (Díaz Rodríguez, 2005) está asociada a la cantidad de energía que se libera generando ondas de compresión P (*P-waves*) y ondas de corte S (*S-waves*).

Las ondas P y S denominadas por Kramer (Kramer, 1996) ondas internas (*body waves*) se vuelven irregulares a medida que se propagan a través del suelo, la velocidad de dicha propagación dependerá de la rigidez del estrato que a su vez es función de su densidad; la *Figura 2* ilustra el comportamiento de las ondas P y S en las diferentes capas de la tierra. Según Sarria (Sarria, 1996) las ondas P se desplazan a mayor velocidad que las ondas S y tienen períodos más cortos, pero las ondas S transportan mayor energía al tener una amplitud superior; las ondas P se comportan como un estrechamiento o estiramiento entre partículas en la misma dirección en la que cambia el estado de esfuerzos y las ondas S que se propagan de forma ortogonal al estado de esfuerzos.

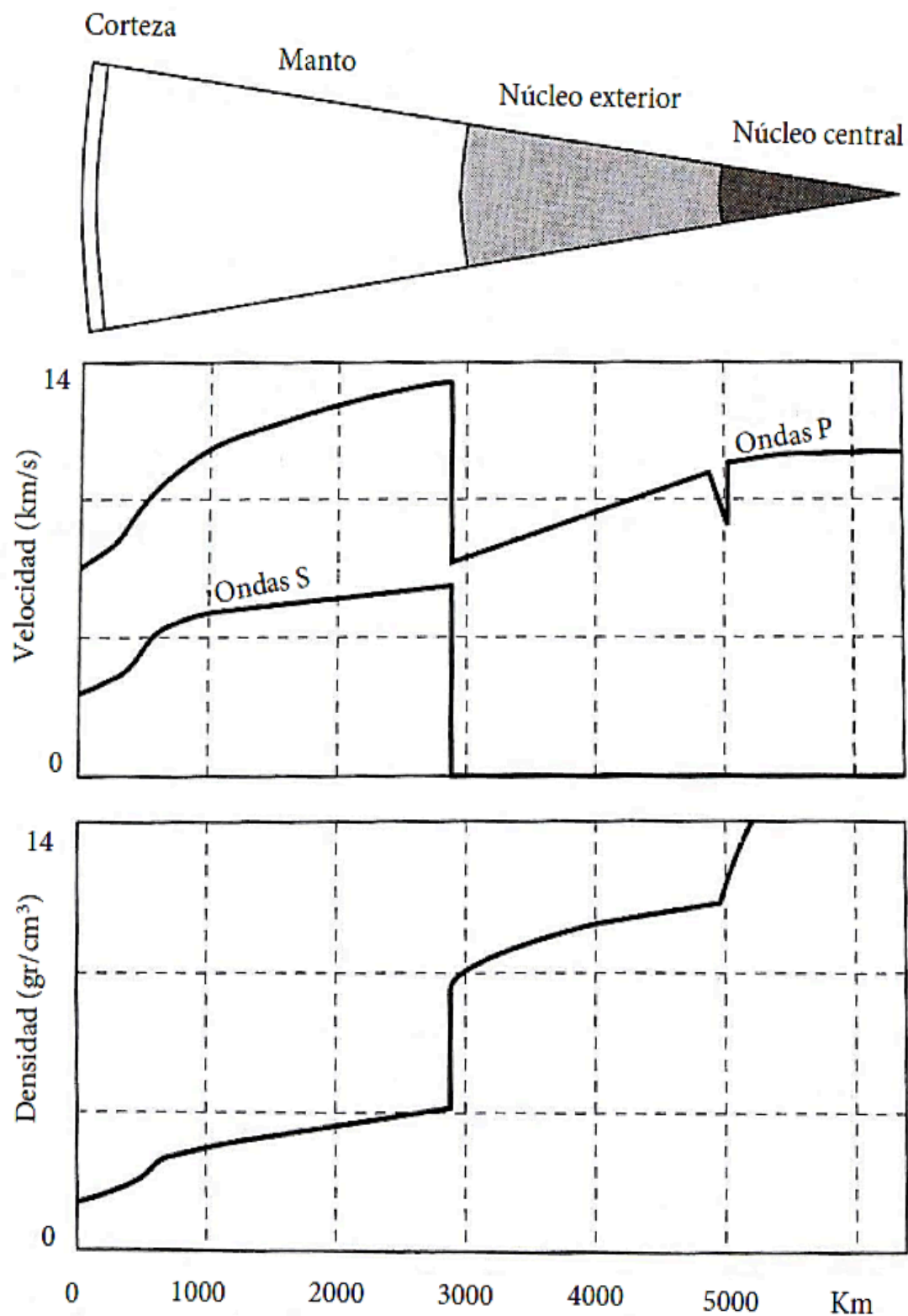


Figura 2 . Velocidad de las ondas S y P en las diferentes capas de la tierra
Fuente: Tomado de Kramer, S L (1996)

Además de las ondas internas existen las ondas de superficie (*surface waves*) que se clasifican en ondas Rayleigh (R) y en ondas Love (L), siendo la velocidad de estas dos similar a la velocidad de las ondas S. En la *Figura 3* se observa el comportamiento de las ondas internas (P y S) y de superficie (R y L).

La velocidad de ondas internas P y S se puede asociar mediante la teoría de la elasticidad a parámetros físicos como el módulo de corte G [ecuación (2.3)], el módulo de Young E [ecuación (2.4)], el módulo volumétrico K [ecuación (2.5)] y la relación de Poisson ν [ecuación (2.6)] (Kramer, 1996), donde γ es el peso específico del material y g la aceleración de la gravedad.

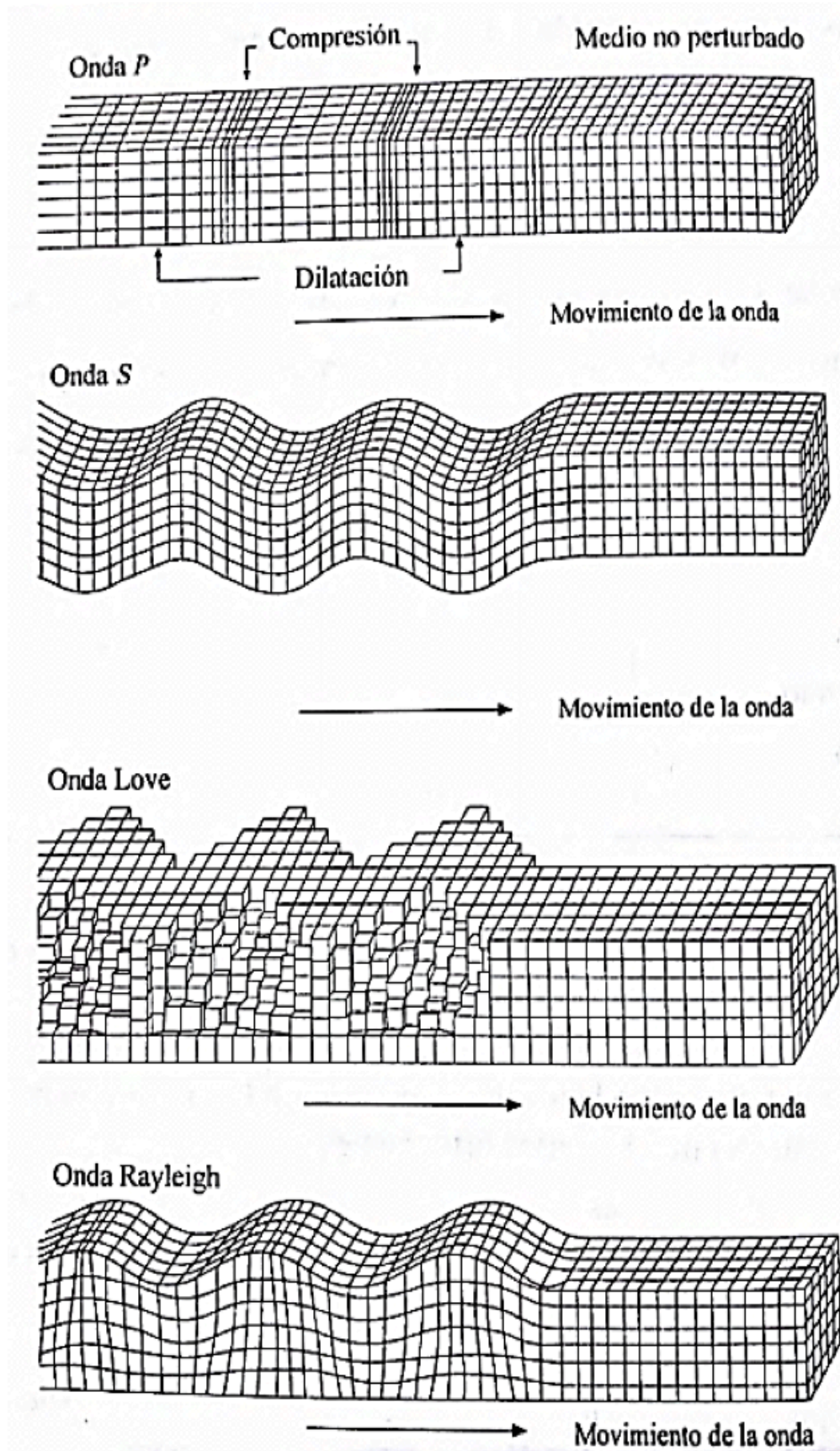


Figura 3 . Comportamiento de las ondas sísmicas
Fuente: Tomado de Sarria (1996)

$$G = \frac{\gamma}{g} V_S^2 \quad (2.3)$$

$$E = \frac{\gamma}{g} \left[3V_P^2 - \frac{V_S^4}{V_P^2 - V_S^2} \right] \quad (2.4)$$

$$K = \frac{\gamma}{g} \left[V_P^2 - \frac{4V_S^2}{3} \right] \quad (2.5)$$

$$v = \frac{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2}{2 \left[\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 1\right]} \quad (2.6)$$

2.4 Ensayo de refracción sísmica

El ensayo de refracción sísmica es una prueba de campo empleada para obtener los valores de las velocidades de onda del suelo, el principio fundamental de este ensayo como lo explica Díaz Rodríguez (Díaz Rodríguez, 2005) es la medición del tiempo de propagación de una onda generada por un martillo o explosivo desde un sitio denominado disparo hasta los puntos llamados de observación donde se ubican sensores (geófonos) a distancias predeterminadas (en campo se realiza una distribución de los geófonos cuyo número varía dependiendo del equipo utilizado). Las ondas P son las primeras en ser detectadas por los geófonos por ser más rápidas que las ondas S (Sarria, 1996).

En la *Figura 4* se muestra la ubicación en campo de un sismógrafo de doce canales que muestra el camino de las ondas sísmicas directas y refractadas en un sistema de suelo-roca de dos capas. El sistema de toma de datos consta de cuatro partes principales: el sistema de arranque, el cable de señal, los geófonos y el equipo registrador (sismógrafo).

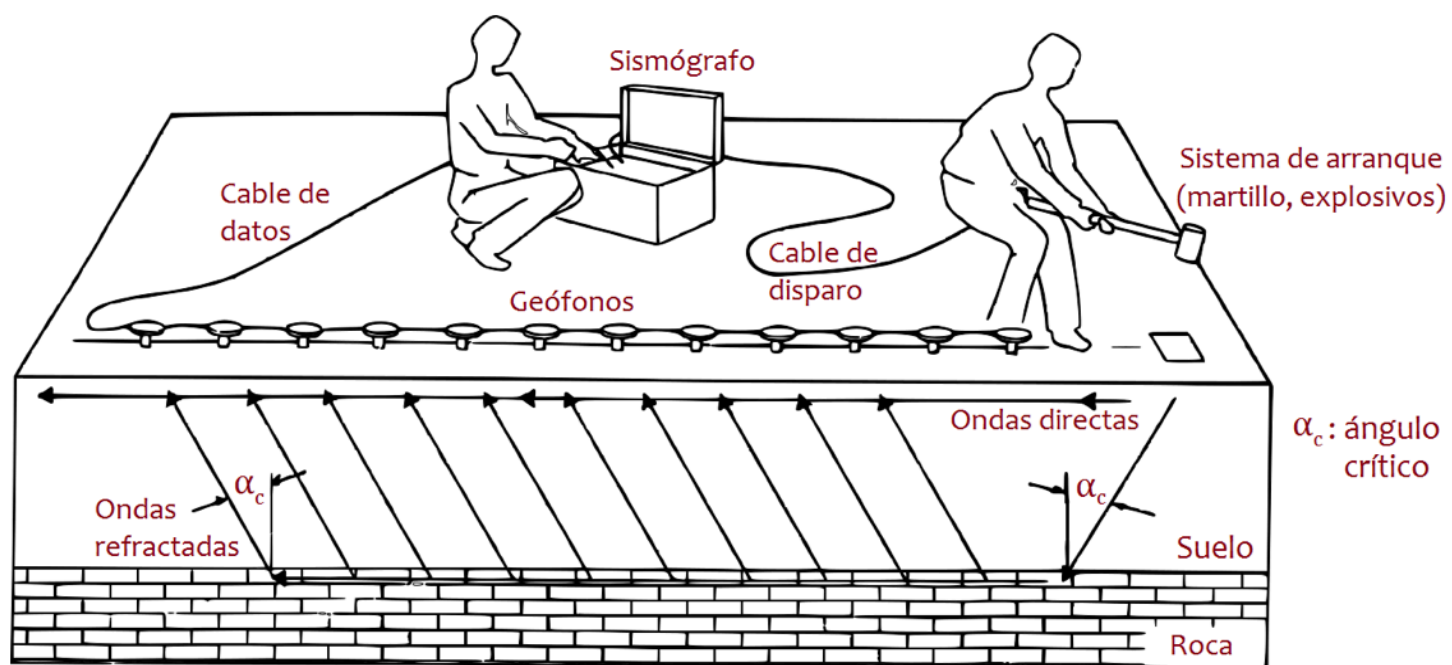


Figura 4 . Distribución en campo de los geófonos en el ensayo de refracción sísmica
Fuente: Tomado de ASTM D5777 (2011)

Según Sarria (Sarria, 1996) el sistema de arranque pone en alerta el equipo registrador, conformado por un martillo que golpea una placa de hierro (*Imagen 3*) dando inicio al circuito

que registra los tiempos. El cable de señal cumple la función de captar las señales de los geófonos y llevarlas al sistema de registro mediante una conexión al equipo (*Imagen 4*), se sugiere que sea delgado y resistente para fácil manejo en campo (Sarria, 1996).



Imagen 3 . Sistema de arranque en campo
Fuente: Propia (2016)



Imagen 4 . Cable de señal (cable extendido en campo y conexión al sistema de registro)
Fuente: Propia (2016)

Los geófonos (*Imagen 5*) captan las señales producidas por las ondas que se desplazan por el terreno, son instrumentos electromecánicos que se hincan en el suelo, están compuestos por una masa y un resorte que la sujeta y una carcasa externa; si entre ellos se forma un campo magnético el voltaje producido por este es proporcional a la velocidad de ondas en el suelo, voltaje que se traslada al equipo de registro mediante el cable (Sarria, 1996).

Por último, se tiene el equipo registrador (*Imagen 6*) el cual es un instrumento electrónico que recibe señales y las almacena, con el empleo de software (*Pickwin* y *Plotrefa*) se procesan los datos recibidos y se generan los perfiles de velocidades en los estratos de suelo (*Figura 5*).



Imagen 5 . Geófono
Fuente: Propia (2016)



Imagen 6 . Equipo de registro de los datos (sismógrafo)
Fuente: Propia (2016)

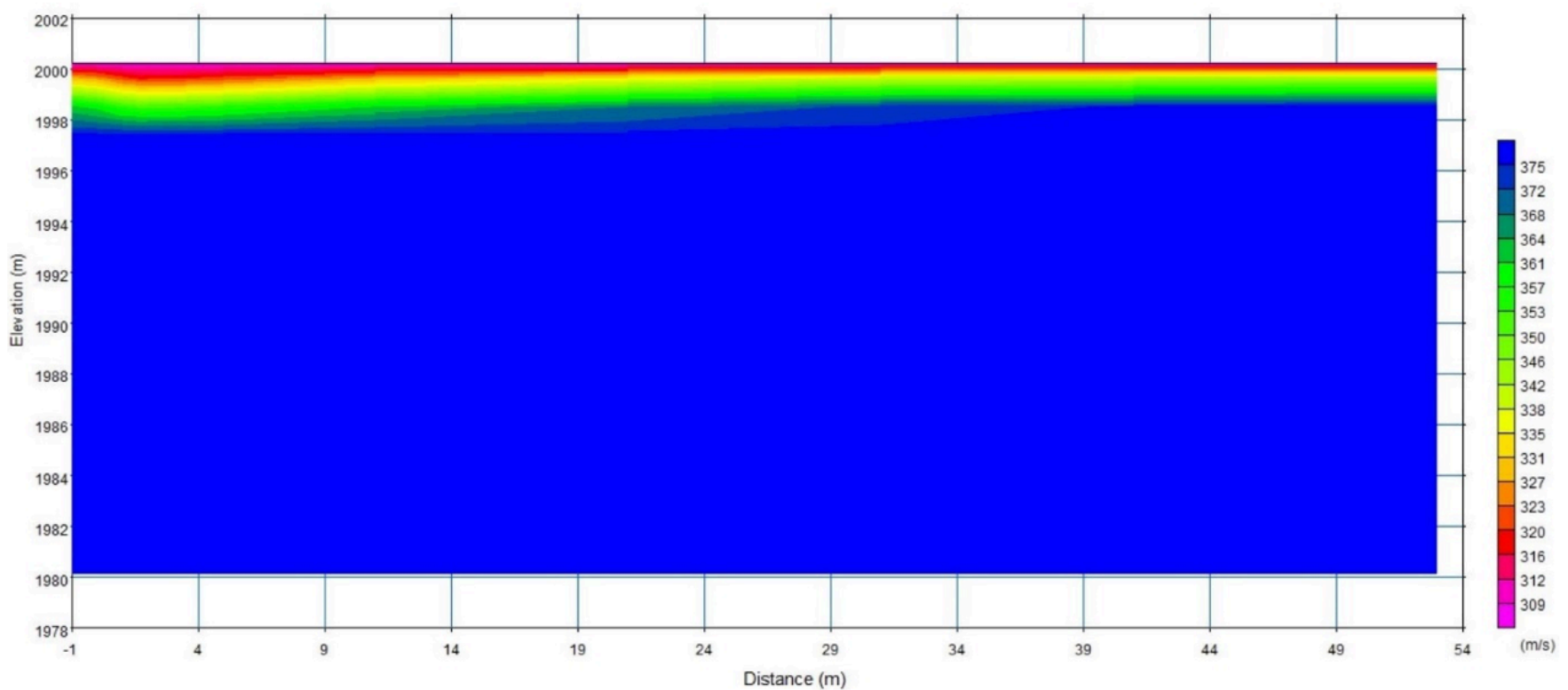


Figura 5 . Tomografía línea de refracción sísmica 7, bloques A y B, CR5 Puerta del Sol
Fuente: Propia (2015), software empleado: Pickwin y Plotrefa

Los valores típicos de velocidad de onda obtenidos de ensayos de campo realizados en la ciudad de Manizales se muestran en la *Tabla 3*.

Tabla 3 . Valores de velocidad de onda para cenizas volcánicas en Manizales

Propiedad	Valor máximo	Valor mínimo	Promedio
Vp (m/s)	459	108	220
Vs (m/s)	250	117	187

Fuente: Elaboración propia con soporte en curadurías urbanas I y II de Manizales, Estudio de microzonificación sísmica de Manizales y Estudio de Gestión del Riesgo

2.5. Correlaciones existentes

En la fase de revisión se pudo establecer que varios autores en diferentes latitudes han desarrollado trabajos para determinar la correlación entre las velocidades de onda con propiedades mecánicas del suelo. Como resultado de estas correlaciones se destacan los estudios hechos por Cha y Cho (Cha & Cho, 2007) donde se muestra en gráficas la correlación de Vs con la relación de vacíos en función del esfuerzo vertical, de igual manera Bery y Saad (Bery & Saad, 2012) proponen una correlación entre Vp y el valor RQD $[Vp=21,951(RQD)+0,1368]$ y el valor de N $[Vp=23,605(N)-160,43]$, Whiteley (Whiteley, 1983) correlaciona la porosidad efectiva, la velocidad de onda Vp y el ángulo de fricción $[\varphi=b-a Vp]$ con b y a constantes a nivel regional, donde se muestra que la porosidad del medio es función de la humedad; Sarria (Sarria, 1996) explica que se pueden presentar incertidumbres en el valor de la velocidad de onda cuando los materiales están saturados. Srivastava y otros (Srivastava, Mukerjee, & Sastry, 2010) hacen la correlación entre Vs con la resistividad eléctrica ρ del suelo $[Vs=48,91 \ln \rho -3,611]$.

Álvarez y otros (Álvarez Manilla Aceves, Garnica Anguas, & Pérez Salazar, 2003) muestran las gráficas de correlación entre la relación de velocidades de onda Vp/Vs con la relación de Poisson

y con el ángulo de fricción para suelos tipo limo de alta plasticidad (MH) del valle del Querétaro. A su vez Akin y otros (Akin, Kramer, & Topal, 2011) muestran desde 1966 hasta 2009 una serie de ecuaciones de correlaciones entre la velocidad de onda V_s con la resistencia a la penetración N , Andrus y otros (Andrus, Piratheepan, Ellis, Zhang, & Hsein Juang, 2004) proponen la correlación para todo tipo de suelos $[(V_s/1)CS=87,8(N/160)CS^{0,253}]$, Hasancebi y Ulusay (Hasancebi & Ulusay, 2007) proponen correlaciones para cualquier tipo de suelo $[V_s=90 N^{0,308}]$, para arenas $[V_s=90,82 N^{0,319}]$, y para suelos arcillosos $[V_s=97,89 N^{0,269}]$, Chien y otros (Chien, Lin, & Oh, 2000) proponen la correlación para arenas limosas $[V_s=22 N^{0,75}]$, Pitilakis y otros (Pitilakis, Raptakis, Lontzetidis, Tika-Vassilikou, & Jongmans, 1999) proponen para suelos arcillosos $[V_s=132 N^{0,271}]$ y arenas limosas $[V_s=160 N^{0,17}]$.

Hanumantharao y Ramana (Hanumantharao & Ramana, 2008) presentan una lista de correlaciones desde el año 1970 hasta 2002 al igual que Naik y otros (Naik, Patra, & Malik, 2014), Dikmen (Dikmen, 2009) propone correlaciones para todo tipo de suelo $[V_s=58 N^{0,39}]$, para arenas $[V_s=73 N^{0,33}]$ y para arcillas $[V_s=44 N^{0,48}]$, así mismo Marto y otros (Marto, Soon, Kasim, & Suhatri, 2013) amplían esta base de datos hasta el año 2012 con la correlación $[V_s=77,13 N^{0,377}]$. Wair y otros (Wair, DeJong, & Shantz, 2012) presentan un resumen cronológico de correlaciones entre la velocidad de onda y parámetros como el valor de N y la resistencia por punta q_c del ensayo de penetración de cono CPT. Dickenson (Dickenson, 1994) propone correlaciones de la velocidad de onda S con la resistencia al corte no drenado C_u $[V_s=23 C_u^{0,475}]$ para suelos cohesivos del área de la playa de San Francisco. Watkins y otros (Watkins, Walters, & Godson, 1972) propusieron la correlación entre la porosidad n y la velocidad de onda P en rocas insaturadas $[n=-0,175 \ln V_p + 1,56]$.

Pérez y otros (Pérez Santisteban, Martín, Carbó, & Fonticiella Ruiz, 2012) resaltan que para desarrollar correlaciones confiables y representativas se debe tener presente la historia geológica (tensiones, composición litológica, edad, etc.) del lugar y en particular el tipo de suelo que se está estudiando, correlacionan la velocidad de onda V_s con el resultado del ensayo de penetración estándar $[V_s=62,6 N^{0,52}]$, con la compresión inconfiada $[V_s=77,13 q_u^{0,268}]$, además de tener en cuenta la influencia de la profundidad en ambas correlaciones $[V_s=71,05 N^{0,259} z^{0,382}]$ y $[V_s=184,57 q_u^{0,198} z^{0,332}]$, y los módulos de Young $[E=1,8 \cdot 10^{-3} V_s^{2,17}]$, compresibilidad $[G=5,7 \cdot 10^{-4} V_s^{2,19}]$ y rigidez $[K=2,2 \cdot 10^{-2} V_s^{1,91}]$.

Del total de correlaciones revisadas no fueron encontradas correlaciones para depósitos de ceniza volcánica en particular, únicamente se hace mención de depósitos tipo limo que son los de mayor similitud a los suelos volcánicos, por ello, la presente investigación pretende dar el primer paso para determinar las correlaciones en este tipo de depósitos cuyo comportamiento particular se debe a su origen, deposición, contenido de humedad y características del esqueleto de suelo.

3. Metodología

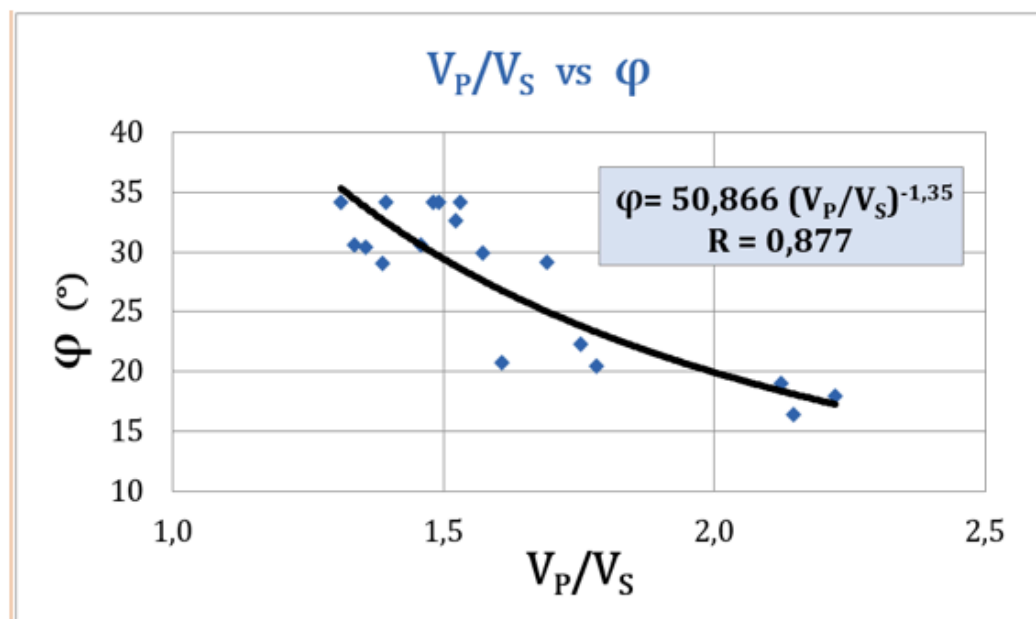
Este documento se enmarca en la metodología investigativa de tipo cuantitativo ya que las variables representadas en datos de laboratorio de suelos se examinan de manera numérica y especialmente en el campo de la ciencia estadística. Adicionalmente como los datos numéricos son empleados sin ninguna manipulación y mediante correlaciones estadísticas, hacemos referencia a una evaluación analítica no experimental. La población objeto del estudio es el área metropolitana de la ciudad de Manizales. Los instrumentos presentes en este proyecto investigativo son los datos de ensayos de laboratorio y ensayos de campo obtenidos en los archivos de las Curadurías urbanas I y II de la ciudad, y las herramientas estadísticas disponibles en la literatura.

4. Análisis de resultados

4.1. Correlaciones propuestas

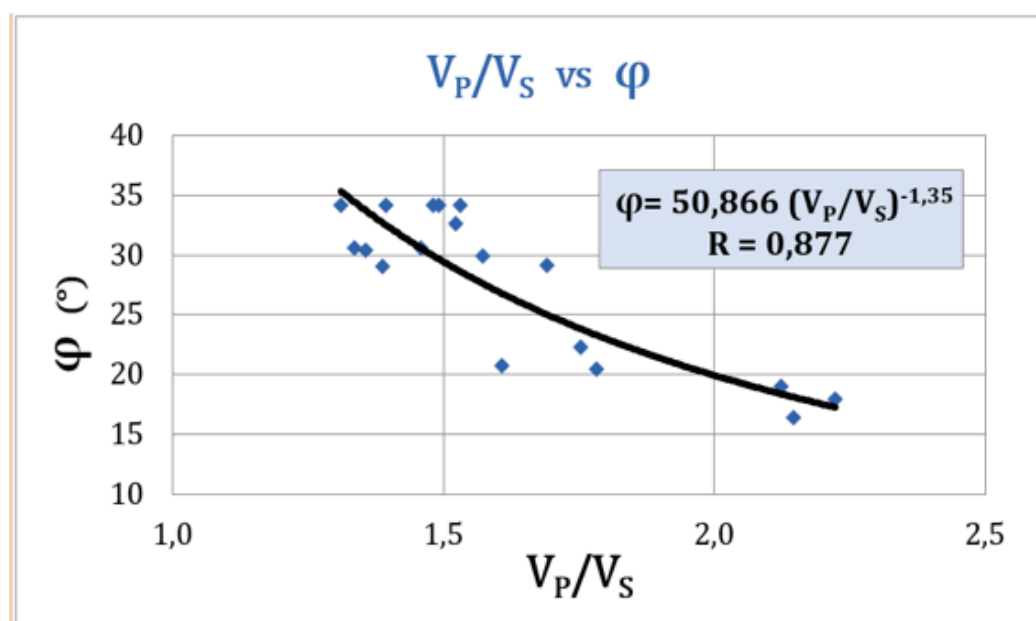
Una vez depurados los datos obtenidos se hace la prueba de bondad de ajuste empleando el test de Kolmogorov-Smirnov (Massey Jr, 1951) validando la aceptación de los mismos. Al realizar el análisis estadístico de la información obtenida se observa que la distribución log-normal es la que mejor interpreta el comportamiento de los datos y el modelo de regresión potencial es el que presenta un mayor ajuste (coeficiente de correlación mayor).

Gráfico 1. Correlación entre relación de velocidades de onda VP/VS y ángulo de fricción para cenizas volcánicas en Manizales



Fuente: Propia

Gráfico 2. Relación entre la razón Vp/Vs y el ángulo de fricción interna para suelos MH y tobas

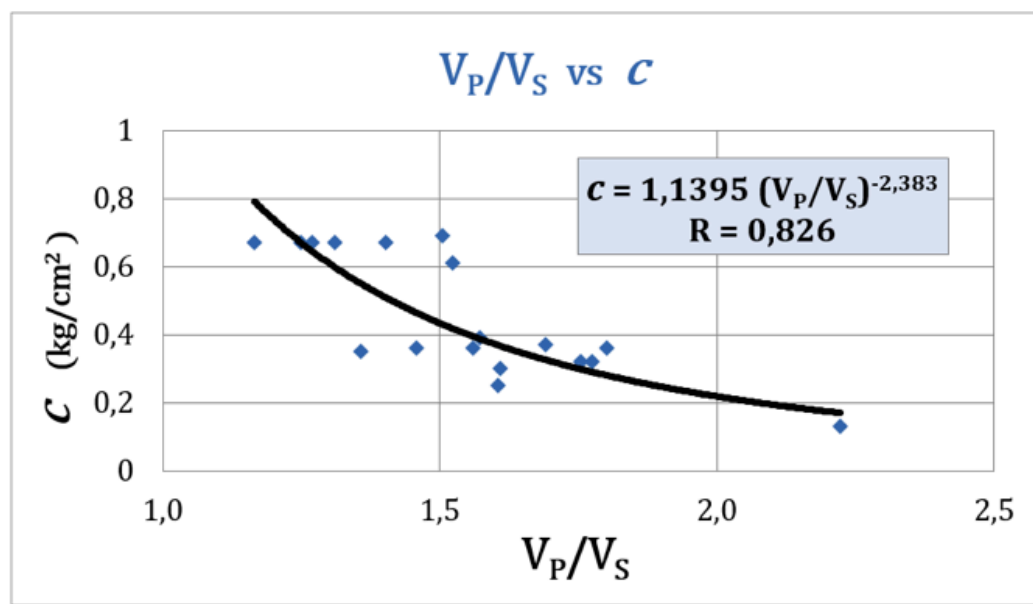


Fuente: Tomado de Álvarez Manilla Aceves et al. (2003)

$$\varphi = 50,866 \left(\frac{V_P}{V_S} \right)^{-1,35} \quad (4.1)$$

La correlación entre el ángulo de fricción y la relación de velocidades de onda propuesta en este documento (Gráfico 1) tiene una misma tendencia que la propuesta por el profesor Álvarez (Gráfico 2), adicionalmente el coeficiente de correlación de 0,87 muestra que la línea de tendencia potencial representa una correlación fuerte.

Gráfico 3. Correlación entre relación de velocidades de onda VP/VS

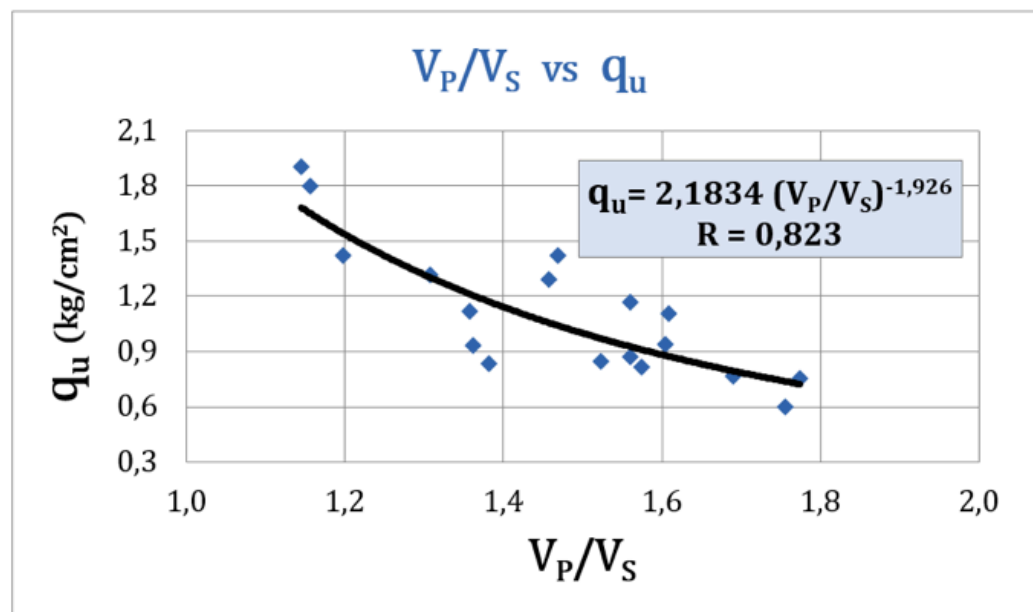


Fuente: Propia

$$c = 1,1395 \left(\frac{V_P}{V_S} \right)^{-2,383} \quad (4.2)$$

Al igual que para el caso anterior la correlación entre la cohesión y la relación de velocidades de onda propuesta en este documento (Gráfico 3) muestra que los datos tienen una correlación fuerte. Sin embargo, al ser la cohesión mucho más sensible a las condiciones de humedad del terreno se considera que su uso puede ser limitado.

Gráfico 4. Correlación entre relación de velocidades de onda V_P/V_S y resistencia a la compresión para cenizas volcánicas en Manizales



Fuente: Propia

$$q_u = 2,1834 \left(\frac{V_P}{V_S} \right)^{-1,926} \quad (4.3)$$

La correlación entre la resistencia a la compresión y la relación de velocidades (Gráfico 4) muestra que la línea de tendencia potencial representa una correlación fuerte entre los datos ya que el coeficiente de correlación es 0,82.

5. Conclusiones

Los suelos derivados de ceniza volcánica (Q_{cp}) constituyen la formación superficial dominante

del municipio de Manizales (45% del área urbana) por lo que gran parte de los fenómenos de inestabilidad estarán asociados a este tipo de suelo, sin embargo, aun no se tiene un conocimiento detallado de estos depósitos desde el punto de vista geotécnico ya que por su origen presentan un comportamiento particular difiriendo del comportamiento típico de los depósitos sedimentarios; adicionalmente los depósitos de ceniza de la ciudad se presentan con una serie de capas intercaladas tales como limos arenosos, lapilli y arena con diversos grados de consolidación, de ahí que otro proyecto investigativo abre la puerta para caracterizar de forma detallada estas capas y así particularizar las propiedades geotécnicas de estos materiales.

Los resultados de laboratorio de las propiedades mecánicas de los suelos derivados de ceniza volcánica muestran un amplio rango de variación donde los diferentes sets tienen un comportamiento específico, es por eso que durante las evaluaciones estadísticas algunos datos mostraban una dispersión considerable. De otro lado durante la revisión de los datos de campo tomados de las pruebas geofísicas se considera que la falta de rigurosidad técnica en la realización de este tipo de ensayos puede conllevar a la aparición de datos no representativos de los estratos, de manera que la implementación de medidas encaminadas al control de calidad en estos ensayos contribuirá a la confiabilidad de las correlaciones propuestas en este documento.

A partir de los valores de velocidad de onda obtenidos en los ensayos geofísicos ($V_s \approx 187$ m/s) se clasifican los depósitos de ceniza volcánica como suelo *tipo D* (MINAMBIENTE, 2010). Adicionalmente los valores de resistencia a la compresión q_u encontrados para este tipo de depósitos (0,2 kg/cm² – 3,45 kg/cm²) corroboran la clasificación.

En la evaluación estadística la prueba de bondad indica la confiabilidad de los datos encontrados, además la distribución de frecuencia que mejor se ajusta a los parámetros geotécnicos estudiados en este documento corresponde la distribución log-normal, a su vez las correlaciones establecidas en esta investigación presentan valores satisfactorios desde el punto de vista estadístico, ya que los coeficientes de correlación son superiores a 0,82; más aun si se comparan con los detectados en la revisión bibliográfica a nivel mundial donde las curvas de correlación muestran una tendencia similar y en lo que tiene que ver con los coeficientes de correlación poseen valores incluso menores. Cabe resaltar de manera particular la correlación de V_p/V_s vs ϕ , cuya línea de tendencia es muy similar a la obtenida por Álvarez y otros (Álvarez Manilla Aceves et al., 2003) en Querétaro. De otro lado en este documento se proponen correlaciones novedosas cuya aplicabilidad queda a juicio de otros investigadores.

Para la ciudad de Manizales los resultados obtenidos pueden ser de utilidad en la evaluación rápida de estabilidad de taludes y estructuras de contención, ya que durante los periodos de lluvia prolongados y especialmente los asociados al fenómeno de la Niña se presentan, en poco tiempo, múltiples eventos de fenómenos de inestabilidad que superan la capacidad de respuesta en lo que tiene que ver con toma de muestras, ensayos y análisis de resultados, por lo cual con este tipo de estudios se podrían obtener los parámetros de resistencia de manera ágil y atender los múltiples eventos teniendo tiempos de respuesta muy cortos que redundarían en la mitigación rápida y efectiva de fenómenos de inestabilidad. También pueden ser empleados para la evaluación preliminar de susceptibilidad y amenaza por deslizamiento de zonas urbanas y rurales ya que las líneas de refracción cubren un área mayor y generan una imagen bidimensional de las unidades estudiadas facilitando la obtención de los parámetros de resistencia del suelo y su ubicación espacial en la zona analizada, por consiguiente identificar con prontitud zonas potencialmente inestables que luego deberán ser estudiadas con mayor profundidad.

Como lo sugiere UNIANDES CIMOC en su estudio de microzonificación de la ciudad (Universidad de los Andes, 2001) este tipo de estudios novedosos enriquece la cultura geotécnica de la región. Adicionalmente, una vez hecha la revisión exhaustiva del estado del arte a nivel mundial respecto a este tipo de correlaciones, los autores coinciden que estas deben hacerse en cada tipo de suelo ya que su origen geológico y su evolución morfológica o de meteorización generan condiciones especiales en cada región, por lo que esta investigación acoge y comparte

totalmente dichas premisas.

Un factor determinante y que se debe tener en cuenta al emplear las correlaciones propuestas es que en los lugares donde se detecte nivel freático muy superficial que sature las capas de suelo volcánico tipo ceniza, los resultados de velocidad de onda pueden verse altamente distorsionados como lo sugiere la literatura y lo encontrado en campo por lo que su aplicación no sería la más adecuada.

Este trabajo investigativo no pretende suplir la prospección geotécnica ni los ensayos de laboratorio convencionales en el análisis de estabilidad de taludes ni de estructuras de contención, se concibe como una herramienta de soporte, por ejemplo, en el caso de evaluación de amenaza por deslizamiento donde generalmente las zonas de estudio son de gran extensión, resultando poco práctica la realización de gran cantidad de ensayos, de ahí que los ensayos geofísicos y estas correlaciones servirían para cubrir grandes extensiones y complementar los ensayos realizados homogeneizando el área de estudio.

Referencias

- Aguirre Montoya, F. M., Ballesteros Botero, H. F., Gutiérrez Arboleda, J. C., & Montoya García, M. (1992). *Modelo tridimensional de las formaciones superficiales de Manizales*. Manizales.
- Akin, M. K., Kramer, S. L., & Topal, T. (2011). Empirical correlations of shear wave velocity (V_s) and penetration resistance (SPT-N) for different soils in an earthquake-prone area (Erbaa-Turkey). *Engineering Geology*, 119(1–2), 1–17.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.01.007>
- Alvarez Manilla Aceves, A., Garnica Anguas, P., & Pérez Salazar, A. (2003). Evaluación indirecta de los módulos elásticos de rigidez in situ y la relación entre V_p/V_s y el ángulo de fricción interna. *Publicación Técnica No. 225*. Sanfandila, Qro.: Instituto Mexicano del Transporte.
- Andrus, R. D., Piratheepan, P., Ellis, B. S., Zhang, J., & Hsein Juang, C. (2004). Comparing liquefaction evaluation methods using penetration-VS relationships. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(9–10), 713–721.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.06.001>
- Berry, P. L., & Reid, D. (1993). *Mecánica de suelos*. McGraw-Hill.
- Bery, A. A., & Saad, R. (2012). Correlation of seismic P-wave velocities with engineering parameters (N value and rock quality) for tropical environmental study. *International Journal of Geosciences*, 3(4), 749–757.
- Cha, M., & Cho, G. C. (2007). Shear strength estimation of sandy soils using shear wave velocity. *Geotechnical Testing Journal*, 30(6), 1–12.
- Chien, L.-K., Lin, M.-C., & Oh, Y.-N. (2000). Shear wave velocity evaluation on reclaimed soil in West Taiwan. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 10(1), 73–79.
- Díaz Rodríguez, J. A. (2005). *Dinámica de suelos*. México, DF: Limusa / UNAM.
- Dickenson, S. E. (1994). *Dynamic response of soft and deep cohesive soils during the Loma Prieta earthquake of October 17, 1989*. Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley.
- Dikmen, Ü. (2009). Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils. *Journal of Geophysics and Engineering*, 6(1), 61–72.
- Hanumantharao, C., & Ramana, G. V. (2008). Dynamic soil properties for microzonation of Delhi, India. *Journal of Earth System Science*, 117(2), 719–730.
- Hasancebi, N., & Ulusay, R. (2007). Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66(2), 203–213.
- IGAC. (2014). *Geografía de Colombia*. Bogotá, DC: Imprenta Nacional de Colombia.
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (1996). *Mecánica de suelos, Tomo I: Fundamentos de la*

mecánica de suelos (3ra ed.). México, DF: Ed.

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice-Hall, Inc.

Marto, A., Soon, T. C., Kasim, F., & Suhatrio, M. (2013). A correlation of shear wave velocity and standard penetration resistance. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18, 463–471.

Massey Jr, F. J. (1951). The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American Statistical Association*, 46(253), 68–78.

Medina López, S. B., & Salazar Gutiérrez, L. F. (2009). Relación entre la resistencia al corte directo y propiedades físicas y químicas en algunos suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé*, 60(3), 253–268. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10778/155>

MINAMBIENTE. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS.

Naik, S. P., Patra, N. R., & Malik, J. N. (2014). Spatial distribution of Shear wave velocity for late Quaternary Alluvial soil of Kanpur city, Northern India. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32(1), 131–149.

Naranjo, J. L., & Ríos, P. A. (1989). Geología de Manizales y sus alrededores y su influencia en los riesgos geológicos. *Revista de La Universidad de Caldas*, 10(1–3), 113.

Peck, R. B., Hanson, W. E., & Thornburn, T. H. (1993). *Ingeniería de cimentaciones*. México, DF: Limusa.

Pérez Santisteban, I., Martín, A. M., Carbó, A., & Fonticiella Ruiz, J. M. (2012). Correlaciones empíricas entre la velocidad de propagación de las ondas S (V_s) y otros parámetros geotécnicos para los suelos de Madrid. In *7a Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica*.

Pitilakis, K., Raptakis, D., Lontzetidis, K., Tika-Vassilikou, T., & Jongmans, D. (1999). Geotechnical and geophysical description of EURO-SEISTEST, using field, laboratory tests and moderate strong motion recordings. *Journal of Earthquake Engineering*, 3(3), 381–409.

Sarria, A. (1995). *Ingeniería sísmica* (2da ed.). Bogotá, DC: Uniandes, ECOE.

Sarria, A. (1996). *Métodos geofísicos con aplicaciones a la Ingeniería Civil*. Bogotá, DC: Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de los Andes. Uniandes.

Srivastava, S., Mukerjee, S., & Sastry, R. G. (2010). Regression based in-situ shear wave velocity estimation from electrical resistivity data. *Indian Geotechnical Conference*.

Suárez Díaz, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Ingeniería de Suelos Ltda.

UNGRD. (2016). Consolidado Atención de Emergencias. Retrieved from <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Consolidado-Atencion-de-Emergencias.aspx>

Universidad de los Andes. (2001). Microzonificación sísmica de la ciudad de Manizales, 155. Retrieved from <http://hdl.handle.net/20.500.11762/19861>

Wair, B. R., DeJong, J. T., & Shantz, T. (2012). Guidelines for estimation of shear wave velocity profiles. *PEER: Pacific Earthquake Engineering Research Center Report 2012*, 8.

Watkins, J. S., Walters, L. A., & Godson, R. H. (1972). Dependence of in-situ compressional-wave velocity on porosity in unsaturated rocks. *Geophysics*, 37(1), 29–35.

Wesley, L. D. (2010). *Geotechnical engineering in residual soils*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.

Whiteley, R. J. (1983). Recent developments in the application of geophysics to geotechnical engineering. In *In-situ Testing for Geotechnical Investigations* (pp. 87–110). Rotterdam: A. A. Balkema.

catedrático Departamento de Ingeniería Civil Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.
jorgearistizabalaa@yahoo.com , jaaristizabalar@unal.edu.co

2. Ingeniero Civil Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. namendozaa@unal.edu.co

Revista ESPACIOS. ISSN 0798 1015
Vol. 38 (Nº 32) Año 2017

[Índice]

[En caso de encontrar algún error en este website favor enviar email a [webmaster](#)]

©2017. revistaESPACIOS.com • Derechos Reservados