

PROPIEDADES FÍSICAS E HIDRÁULICAS DE LAS CENIZAS VOLCÁNICAS EN LA TERRAZA DE LLANOGRANDE (RIONEGRO, ANTIOQUIA)

JORGE IVÁN TOBÓN

Profesor Asistente Universidad Nacional de Colombia. jitobon@unalmed.edu.co

DANIEL EDUARDO ARIAS

Ingeniero Civil Universidad Nacional de Colombia. geotecnic@unalmed.edu.co

MARCELA JARAMILLO

Geóloga Universidad Nacional de Colombia. marce@epm.net.co

Recibido para revisar 24 de Junio de 2003, aceptado 19 de Octubre de 2003, versión final 19 de Octubre de 2003

RESUMEN: Investigando la hidrología de la zona vadosa en la terraza de Llanogrande, se caracterizaron las propiedades físicas e hidráulicas de las cenizas volcánicas que son su principales constituyentes, obteniéndose información que, de manera indirecta, mejora el conocimiento estratigráfico de ellas. Con un barreno *auger* se hicieron 15 perforaciones en la zona y con un tubo de pared delgada, de 2.5" de diámetro, se tomaron 70 muestras de los diferentes horizontes de cenizas. Se diferenciaron seis horizontes diagnósticos, esencialmente por su color y textura, y al analizar sus propiedades físicas e hidráulicas se encontró que éstas presentan un salto en su comportamiento a la altura del tercer horizonte, seguramente como respuesta a los distintos eventos volcánicos que les han dado origen. Esto permitió separar las cenizas en dos unidades o paquetes diferentes en la vertical, lo cual es congruente con lo encontrado por autores como Toro y Hermelín (1989) y Vera (2001).

PALABRAS CLAVES: Cenizas volcánicas, Propiedades físicas e hidráulicas, Hidrología, Zona vadosa, Llanogrande, Oriente Antioqueño.

ABSTRACT: While investigating the hydrology of the vadose zone in the Llanogrande terrace (Oriente Antioqueño), the physical and hydraulic properties of volcanic ashes, as its main component, were characterized; obtaining information that allowed improving the stratigraphic knowledge of those ashes. In the zone, 15 perforations were made with an *auger*, with a thin wall tube of 2.5" of external diameter, 70 samples of the different ashes horizons were obtained. It was possible to identify inside the ashes six diagnostic horizons based on their color and texture. Nevertheless, when analyzing their physical and specially their hydraulic properties it was found that they present a jump in their behavior at the height of the third horizon, probably as a result of the different volcanic events that originated them. This allowed to separate the ashes into two different units or packages, which is congruent with what was found by authors like Toro and Hermelin (1989) and Vera (2001).

KEY WORDS: Volcanic ashes, Physical and hydraulic properties, Hydrology, Vadose zone, Llanogrande, Oriente Antioqueño.

1. INTRODUCCIÓN

Las propiedades físicas e hidráulicas de los suelos son fundamentales para entender el

fenómeno de circulación de agua a través de ellos, pero también permiten caracterizarlos y separarlos en paquetes o unidades diferentes en profundidad de acuerdo con el

comportamiento de sus valores. En este caso en particular, al analizar los datos obtenidos después de evaluar las propiedades físicas e hidráulicas de los diferentes horizontes de cenizas volcánicas en la zona, se notó un cambio brusco en la tendencia de los valores a la altura del tercer horizontes, lo cual se asoció a la presencia de dos paquetes diferentes de ceniza en el área.

El principal objetivo de este artículo es reportar este comportamiento de las propiedades físicas e hidráulicas en profundidad y mostrar cómo con ellas también se pueden separar los suelos que registran las diferentes erupciones volcánicas, las cuales han sido identificadas con análisis

mineralógicos y dataciones por autores como Toro y Hermelín (1989) y Vera (2001).

2. GENERALIDADES

El área de trabajo, de aproximadamente 64 km², está localizada en la parte norte de la Cordillera Central de Colombia, a unos 55 km al oriente de la ciudad de Medellín, en jurisdicción del Municipio de Rionegro (Figura 1), entre las coordenadas N: 1166000 E: 848000 y N: 1174000 E: 856000, con origen en Bogotá.

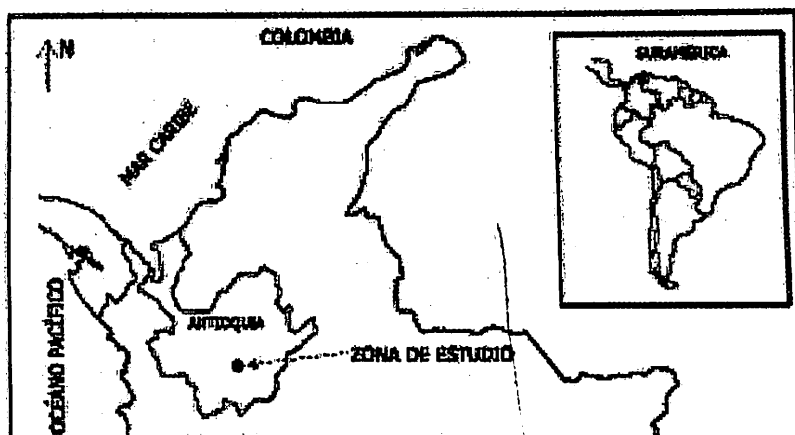


Figura 1. Ubicación zona de estudio

La temperatura promedio varía entre 17°C y 20°C (HIDRAMSA, 1997) y la precipitación media anual es de 2.150 mm con dos periodos mayores de lluvia entre abril - mayo y septiembre - noviembre, intercalados con dos periodos menos húmedos entre diciembre - marzo y junio - agosto (MASORA, 1996).

Desde el punto de vista geológico regional, el área está conformada por rocas metamórficas que afloran esencialmente al occidente y sur de la zona de estudio y corresponden a serpentinitas, granulitas, migmatitas, esquistos y anfibolitas (Restrepo y Toussaint, 1987). El cuerpo ígneo principal es el Batolito Antioqueño sobre el cual se formó la Terraza de Llanogrande. Se presentan además terrazas aluviales asociadas principalmente al río Negro y a las quebradas La

Mosca, La Marinilla y La Cimarrona (Hoyos *et al*, 2001) y depósitos de vertiente y de cenizas volcánicas que recubren concordantemente la topografía, constituyendo la formación superficial más importante (Vera, 2001) (Figura 2).

La Terraza de Llanogrande, denominada Terraza 6 (Page & James, 1981), es la más extensa de todas las identificadas y está ubicada en la cota 2120 m.s.n.m., con una ligera pendiente hacia el Este. Está formada por una intercalación de arenas, limos y gravas, depositados sobre suelo residual del Batolito Antioqueño, cubiertos de ceniza volcánica provenientes de las distintas erupciones del complejo volcánico Ruiz - Tolima (Vera, 2001). Su espesor máximo es de 25 m, pero en la mayor parte de su extensión tiene un par de metros y en algunos casos no sobrepasa los 0,5 m.

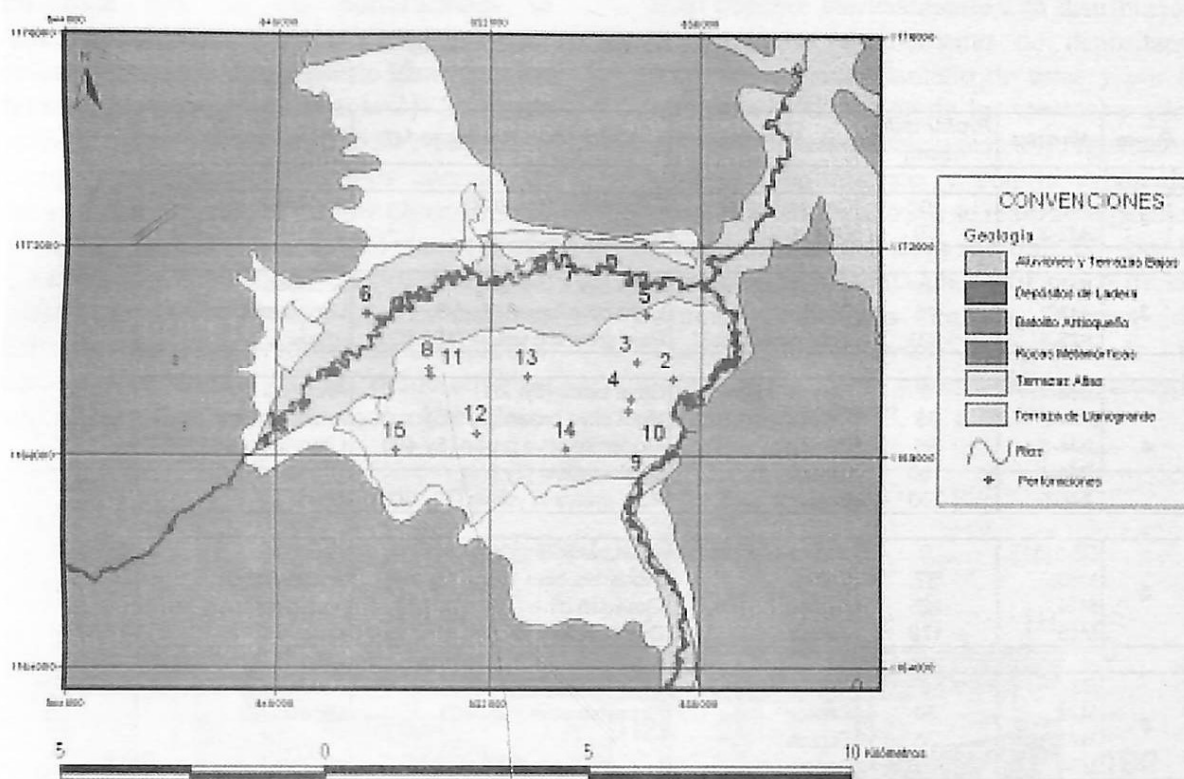


Figura 2. Delimitación de la Terraza, geología y ubicación de los puntos de muestreo.

3. METODOLOGÍA

Con el fin de obtener muestras de cada uno de los horizontes diagnósticos del suelo se hicieron 15 perforaciones con un barreno manual tipo *Aüger* de 3" (Figura 2). Al inicio de cada horizonte, se tomó una muestra de entre 20 cm y 25 cm de altura con un tubo *Shelby* de 2,5" de diámetro. A las muestras recolectadas se les determinaron en campo la textura y estructura por comparación visual y en laboratorio se realizaron alrededor de 1.100 ensayos para definir textura (Analizador de distribución de tamaño de partículas COULTER LS-130), densidad aparente, humedad gravimétrica, lavado sobre malla # 200, gravedad específica, límites de consistencia, conductividad hidráulica saturada y retención de humedad (succiones de 0,3, 0,6, 1,0, 3,0, 5,0, 7,0, 10,0 y 15,0 bares). Además de estos ensayos, se calcularon por medio de las propiedades índice y algunas relaciones gravimétricas, la relación de vacíos, la porosidad y el grado de

saturación de los especímenes de suelo analizados.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 GEOLOGÍA DE UNIDADES SUPERFICIALES

La Terraza está fraccionada con pequeñas porciones al norte y su masa principal al sur del río Negro donde se concentraron los trabajos (Figura 2). Sobre ella se pudo identificar fundamentalmente una unidad de suelo, al nivel de orden (Buol, Hole and McCracken, 1990), que corresponde a un Andisol. Los suelos en esta zona son muy homogéneos y tienen fundamentalmente los mismos usos: pastoreo, fincas de recreo, urbanizaciones y cultivos de flores. El muestreo se realizó en zonas de pastoreo.

En la Tabla 1 se presenta las muestras tomadas en cada punto, la profundidad, el color, tipo de material y la textura.

Tabla 1. Horizontes Diagnósticos

Punto	Muestra	Profundidad (cm)	Material	Color (muestra húmeda)	Textura
2	JM2-1	0	Ceniza-orgánico	Olive black (5yr 2/1)	Arcilloso
	JM2-2	70	Ceniza		
3	JM3-1	0	Ceniza-orgánico	Olive black (5yr 2/1)	Arcilloso
	JM3-2	45	Ceniza	Light olive brown (5y 5/6)	Limo-arcilloso
	JM3-3	120	Depósito aluvial	Pale greenish yellow (10y 8/2)	Arena
4	JM4-1	0	Ceniza-orgánico	Olive black (5yr 2/1)	Arcilloso
	JM4-2	35	Ceniza	Light olive brown (5y 5/6)	Arcillo-limoso
	JM4-3	95	Ceniza	Moderate olive brown (5y 4/4)	Limo-arenoso
	JM4-4	150	Ceniza	Dusky yellow (5y 6/4)	Limo-arenoso
	JM4-5	200	Depósito aluvial	Pale greenish yellow (10y 8/2)	Arena
5	D5-1(51)	0	Ceniza-orgánico	Olive black (5yr 2/1)	Arcilloso
	M13	37	Ceniza	Moderate olive brown (5y 4/4)	Arcillo-limoso
	M14	125	Ceniza	Graayish olive (10y 4/2)	Arcillo-limoso
	M15	170	Ceniza	Dusky yellow (5y 6/4)	Limoso
8	D8-1	0	Ceniza-orgánico	Olive black (5yr 2/1)	Arcilloso
	M22	30	Ceniza	Graayish olive (10y 4/2)	Limoso
	M23	75	Ceniza		
	M24	135	Ceniza		
10	D10-1(53)	0	Ceniza-orgánico	Olive black (5yr 2/1)	Arcilloso
	M27	35	Ceniza	Light olive brown (5y 5/6)	Limo-arcilloso
	M28	65	Ceniza	Moderate olive brown (5y 4/4)	Arcilloso
	M29	100	Ceniza	Moderate olive brown (5y 4/4)	Arcillo-limoso
	M30	140	Ceniza	Light olive gray (5y 6/1)	Limoso
11	JM11-1	0	Ceniza-orgánico	Olive black (5yr 2/1)	Arcilloso
	JM11-2	15	Ceniza	Graayish olive (10y 4/2)	Limoso
	JM11-3	73	Ceniza		
12	JM12-1	0	Ceniza-orgánico	Olive black (5yr 2/1)	Arcilloso*
	JM12-2	40	Ceniza	Light olive brown (5y 5/6)	Limo- leve/ arcilloso*
	JM12-3	70	Ceniza	Moderate olive brown (5y 4/4)	Limoso*
	JM12-4	120	Ceniza	Light olive gray (5y 6/1)	Arcilloso*
	JM12-5	160	Depósito aluvial	Greenish gray (5gy 6/1)	Limo-arcilloso*
13	JM13-1	0	Ceniza-orgánico	Olive black (5yr 2/1)	Arcilloso
	JM13-2	45	Ceniza	Light olive brown (5y 5/6)	Limo-arenoso
	JM13-3	90	Ceniza	Light olive brown (5y 5/6)	Limo-arenoso
	JM13-4	115	Ceniza	Light olive brown (5y 5/6)	Limo-arcilloso
	JM13-5	138	Ceniza	Dusky yellow (5y 6/4)	Arena fina
	JM13-6	165	Ceniza	Pale olive (10y 6/2)	Limoso
	JM13-7	195	Depósito aluvial	Pale greenish yellow (10y 8/2)	Arena
14	JM14-1	0	Ceniza-orgánico	Olive black (5yr 2/1)	Arcilloso*
	JM14-2	47	Ceniza	Light olive brown (5y 5/6)	Limo-arcilloso*
	JM14-3	110	Ceniza	Moderate olive brown (5y 4/4)	Limo- leve/ arcilloso*
	JM14-4	160	Ceniza	Dusky yellow (5y 6/4)	Arcilloso*
15	JM15-1	0	Ceniza-orgánico	Olive black (5yr 2/1)	Arcilloso*
	JM15-2	28	Ceniza	Dusky yellow (5y 6/4)	Arcillo-limoso*
	JM15-3	75	Ceniza	Dusky yellow (5y 6/4)	Arcilloso*

* Muestras a las que su distribución granulométrica se les definió con el Coulter LS-300.

En cada una de las perforaciones se describieron las muestras (especialmente color y textura) lo que permitió identificar los horizontes diagnósticos (Tabla 1). Se puede apreciar como en un mismo horizonte hay variaciones texturales (cambios laterales de facies), por ejemplo, el "*Light Olive Brown*" va desde levemente arcilloso hasta limo-arenoso, predominando limo-arcilloso; el "*Moderate Olive Brown*" desde arcilloso hasta limo-arenoso, predominando el arcillo-limoso; y el "*Dusky Yellow*" desde arcilloso hasta arena fina, predominando el arcilloso.

Esto obedece esencialmente a la distribución de partículas al momento de depositarse (controlada por el tamaño de éstas y por la intensidad y dirección de los vientos) y a los diferentes eventos volcánicos allí registrados. Con esta información y con la ayuda del programa Rockworks99, se realizaron perfiles estratigráficos del área de interés. En la Figura 3, se presenta un perfil típico de las cenizas volcánicas en la Terraza de Llanogrande generado a partir de la interpolación de la información obtenida de los puntos 15, 12, 13, 14 y 10.

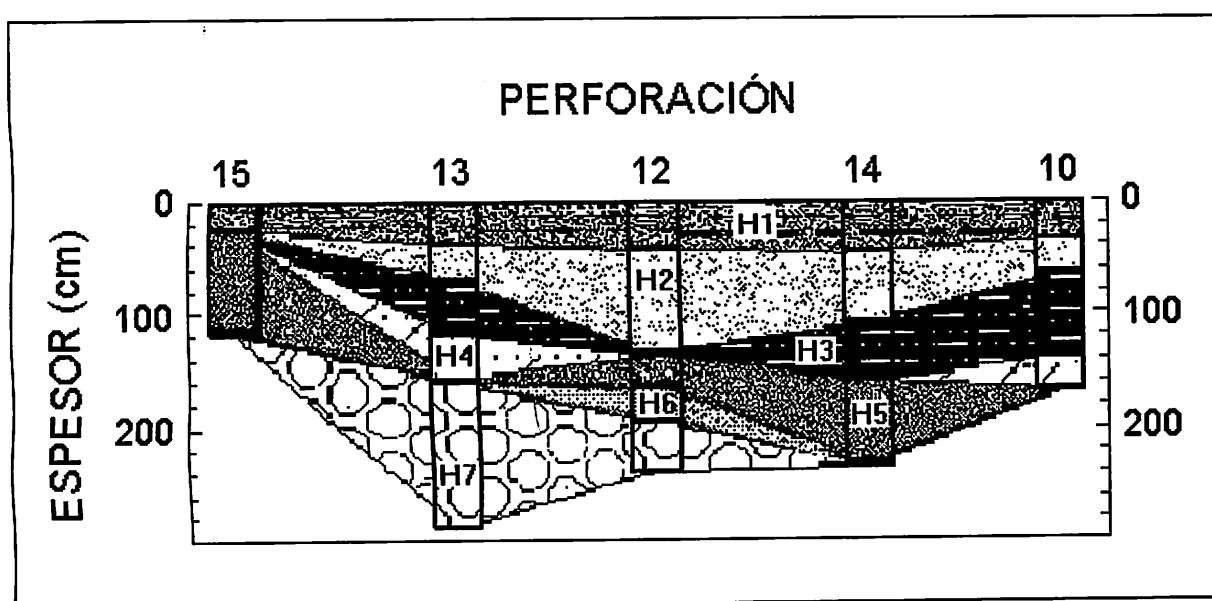


Figura 3. Perfil típico de las cenizas volcánicas en la Terraza de Llanogrande.

De las perforaciones realizadas, se puede concluir que la capa total de cenizas volcánicas en el área tiene un espesor entre 90 cm y 250 cm, presentando la siguiente variación en el color y la textura de techo a piso:

H1 Olive Black (5YR 2/1): Capa orgánica que presenta estructura de bloques y abundante materia orgánica. De buena continuidad en toda el área debido seguramente a que los materiales volcánicos presentan uniones estables con los compuestos húmicos haciéndola resistente a la erosión (IGAC, 1991), con un espesor promedio entre 30 cm y 40 cm. Textura predominantemente arcillosa.

H2 Light Olive Brown (5Y 5/6): Cenizas bioturbadas. Presente en casi toda el área, excepto en los puntos 8, 11 y 15, con espesor medio de 60 cm. Estructura columnar pobremente desarrollada y un contenido importante de raíces, aunque mucho menor que el horizonte orgánico. Textura predominantemente limo-arcillosa.

H3 Moderate Olive Brown (5Y 4/4): Condición similar al anterior pero con espesor medio de 40 cm y textura predominante arcillo-limoso.

H4 Light Olive Gray (5Y 6/1): De poca continuidad en el área y con espesores muy variables entre 5 cm y 20 cm. Escaso contenido de raíces. Textura entre arcillosa y limosa.

H5 Dusky Yellow (5Y 6/4): Espesor muy variable entre 10 cm y 100 cm. Escaso contenido de raíces. Textura arcillosa.

H6 Pale Olive (10Y 6/2): Poca continuidad y espesor muy variables (5 y 20 cm). Textura limosa.

H7 Pale Greenish Yellow (10Y 8/2): Horizonte correspondiente a la arena del depósito aluvial.

4.2 ANÁLISIS FÍSICOS

Porosidad: La media es del 70%. La porosidad tiene una variación importante inclusive al interior de un mismo horizonte como resultado de los cambios texturales. Los tres primeros horizontes tienen valores muy parecidos pero se reduce para los otros con un quiebre en el tercer horizonte (Figura 4).

Gravedad específica: Está entre 2,0 y 2,7 lo que muestra que mineralógicamente las cenizas están constituidas por fases de composición entre ácidas e intermedias. Su valor se incrementa con la profundidad (Figura 4).

Densidad aparente: Se encontraron densidades aparentes muy bajas ($<1.0 \text{ g/cm}^3$) lo que permite clasificar las cenizas como arcillas (IGAC, 1990), lo cual no es necesariamente cierto dados los resultados obtenidos en el análisis textural. En el caso de los depósitos aluviales se acomodan muy bien como materiales arenosos. La densidad aparente media presenta valores muy similares hasta el tercer horizonte y después se incrementan paulatinamente desde $0,6 \text{ g/cm}^3$ hasta $1,6 \text{ g/cm}^3$ (Figura 4).

Peso unitario: El húmedo presenta una media de $13,9 \text{ KN/m}^3$ y el seco de $7,5 \text{ KN/m}^3$ para las cenizas.

Límites de consistencia: Con el límite líquido (LL_{CP}) y el índice de plasticidad (IP) los suelos se pueden clasificar, desde el punto de vista geotécnico, de acuerdo con la Norma ASTM D2487-98, como limo de alta compresibilidad o limo orgánico de alta compresibilidad (MH u OH), lo cual es compatible con lo observado en campo, donde este material, a pesar de presentar textura de limo, se deja comprimir y moldear.

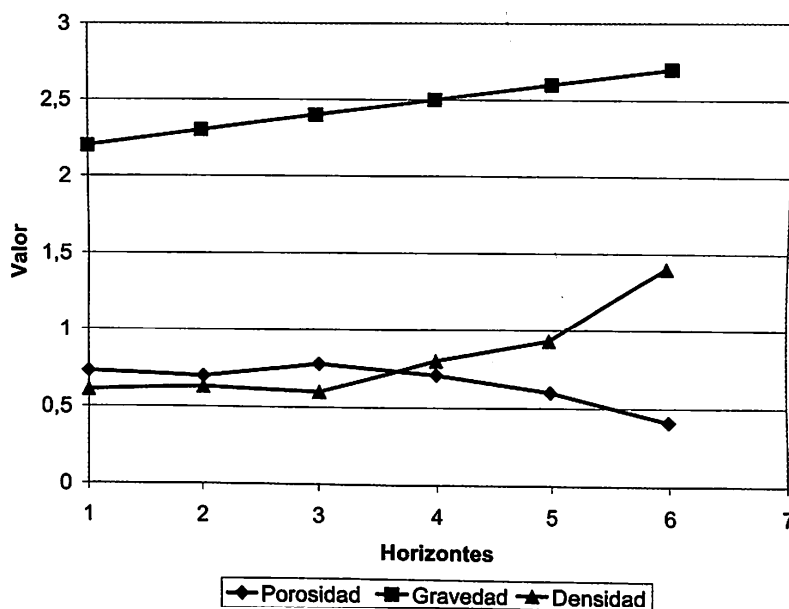


Figura 4. Comportamiento de algunas propiedades físicas en el perfil propuesto

Textura: El pasante en la Malla 200 mostró que los suelos del área son bastante finos, ya que el 90,4% en promedio corresponden a

limos y arcillas. Para precisar más esta información, que es esencial al momento de evaluar la textura, se analizaron las muestras

de los puntos 12, 14 y 15 en el Coulter LS-130. El punto 12 presentado en la Figura 5, por ejemplo, presenta un incremento en el tamaño de partícula desde arcilloso en el más superior (*Olive Black*) hasta limoso en el tercer horizonte identificado (*Moderate Olive Brown*), lo cual es consecuente con lo conocido en el desarrollo de perfiles de suelo. Pero para el cuarto horizonte, *Light Olive Gray*, se reduce nuevamente el tamaño de

partícula hasta arcilloso, evidenciando la presencia de un paleosuelo. Esto podría explicarse como el resultado de eventos volcánicos diferentes. Esto también ayudaría a entender el comportamiento de la porosidad y de la densidad aparente por horizontes, ya que se ve un quiebre brusco para el comportamiento de estas propiedades a la altura del tercer horizonte.

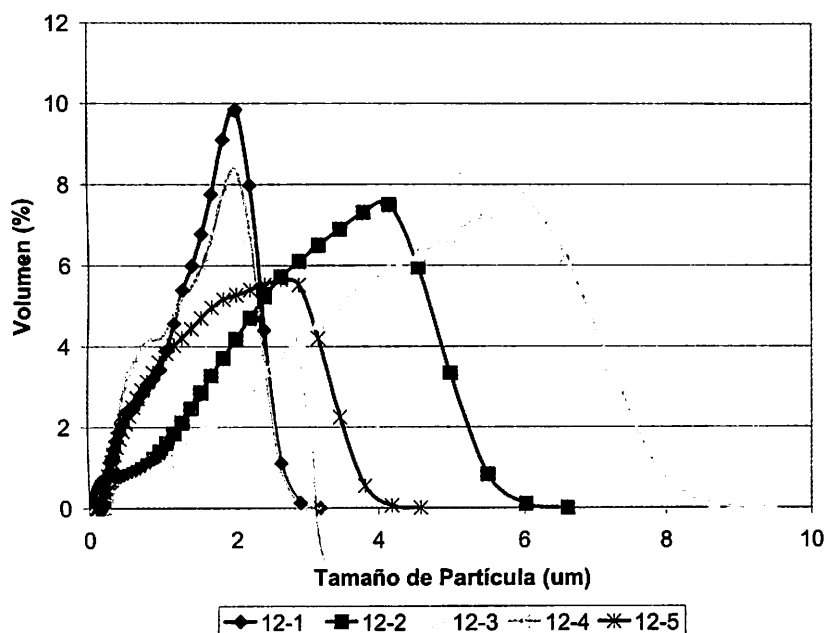


Figura 5. Distribución granulométrica punto 12.

4.3 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS

Saturación y humedad del suelo: Aunque las muestras se tomaron en diferentes épocas, la mayoría son del año 2002, que fue bastante lluvioso, por lo cual el grado de saturación de todas es muy alto (89,31% en promedio), pero se encuentran valores mínimos de 37,71% que corresponde a los períodos más secos y máximos de 100% en los períodos más húmedos. Este mismo comportamiento se observa en la humedad volumétrica, con un valor medio de 65,3%, mínimo de 16,5% y máximo del 100%. Esto demuestra la variabilidad temporal en el contenido de agua de las cenizas volcánicas formadoras de estos suelos.

Conductividad hidráulica saturada: En general disminuye con la profundidad y presenta valores entre $7,22\text{E-}07$ cm/s y $3,24\text{E-}04$ cm/s con un valor medio de $5,43\text{E-}05$ cm/s, que corresponde a conductividades hidráulicas saturadas muy bajas y bajas (Kutilek, 1994 en Vera 2001). En la Tabla 2, se puede ver cómo hay un descenso en la conductividad hidráulica saturada media con la profundidad en los tres primeros horizontes de la estratigrafía propuesta. Sin embargo, en el cuarto horizonte (*Light Olive Gray*) hay un incremento en K_s , pero de éste hacia abajo la conductividad sigue disminuyendo. Esto reafirma lo encontrado con los parámetros físicos, donde se planteó la existencia de cenizas en la Terraza de Llanogrande provenientes de mínimo dos erupciones volcánicas diferentes.

Tabla 2. Conductividades hidráulicas saturadas por horizontes

Horizonte	Conductividad Hidráulica Saturada (cm/s)		
	Mínima	Máxima	Media
<i>Olive Black</i>	2,67E-06	3,24E-04	7,51E-05
<i>Light Olive Brown</i>	2,05E-06	3,43E-04	5,81E-05
<i>Moderate Olive Brown</i>	7,22E-07	1,94E-06	2,96E-06
<i>Light Olive Gray</i>	2,27E-06	8,22E-05	4,22E-05
<i>Dusky Yellow</i>	6,44E-07	2,22E-05	4,99E-06
<i>Pale Olive</i>	1,29E-06	1,29E-06	1,29E-06

Curvas características: Se trazan con la tensión de humedad (succión necesaria para liberar el agua del suelo) y los resultados de humedad gravimétrica. En la Figura 6, se presentan las curvas correspondientes al punto 14 (tensión en bares contra porcentaje de humedad volumétrica) y se aprecia cómo la mayor pérdida de humedad se da a tensiones bajas (más o menos hasta los tres bares), mientras que a tensiones mayores el agua se libera muy lentamente, haciéndose asintótica la curva. Otro aspecto a resaltar en la gráfica es el control de la textura, lo que explica la gran variabilidad de la humedad a

una tensión determinada para un mismo horizonte. Las muestras 14-1 y 14-4, cuyas curvas se encuentran más hacia la derecha del gráfico, corresponden a materiales arcillosos, mientras que las muestras 14-2 y 14-3, que son limos-arcillosos, están al lado izquierdo. En la muestra 14-3 el contenido de arcilla es menor que en la 14-2, de acuerdo con los resultados arrojados por el Coulter, por lo cual su curva está mucho más a la izquierda en la figura. Esto sólo corrobora algo que han dicho muchos autores: que entre más finos son los materiales mayor es su capacidad de retener humedad.

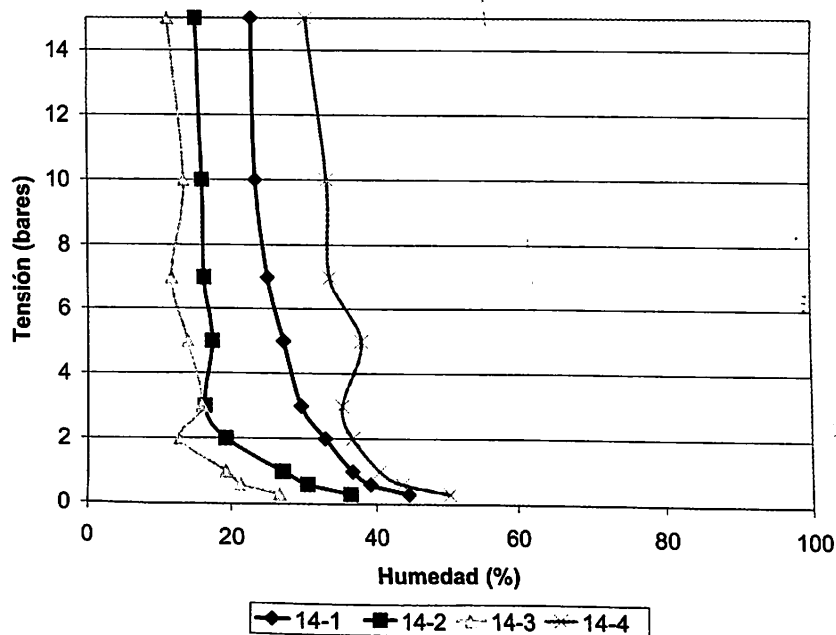


Figura 6. Curvas características Punto 14.

Al graficar los valores medios por horizontes, se puede ver que hasta el *Light Olive Gray* hay un aumento progresivo de la humedad para después disminuir bruscamente en el horizonte *Dusky Yellow* y continuar con una tendencia a la baja hasta el Depósito Aluvial (que es el menor de todos) especialmente para las humedades a los 15 bares. Esto está de acuerdo con lo encontrado para la conductividad hidráulica saturada y para los parámetros físicos de las cenizas, donde se dijo que hasta el tercer horizonte existía un comportamiento de las propiedades diferente del resto de horizontes del suelo de la Terraza de Llanogrande.

En la realización de este trabajo se tuvo mucha dificultad desde el punto de vista logístico y operativo para la estimación de la

humedad a 15 bares de las diferentes muestras, por lo que se intentó encontrar alguna forma de estimarla con base en otro parámetro. Con la variable que mayor afinidad se le encontró fue con la humedad a 0,3 bares. Establecida la hipótesis sobre los dos eventos volcánicos, se hizo el gráfico únicamente para los tres primeros horizontes (*Olive Black*, *Light Olive Brown* y *Moderate Olive Brown*), ya que estos conforman la unidad de suelo superficial desarrollada sobre las cenizas volcánicas más recientes depositadas en el área, lo que mostró un ajuste lineal entre los dos parámetros de 95% ($R^2 = 0,95$) y la ecuación de la recta se puede expresar de la siguiente manera: $y = 0,63x - 5,67$ (Figura 7).

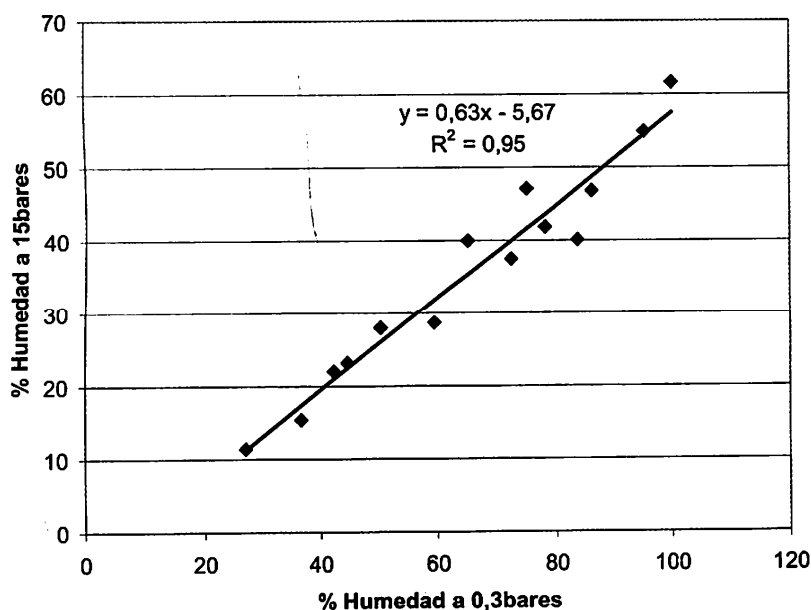


Figura 7. Relación entre las humedades retenidas a 0.3 y a 15 bares para los tres primeros horizontes.

5. CONCLUSIONES

- Las cenizas volcánicas en el área tienen un espesor entre 90 cm y 250 cm identificándose seis horizontes diagnósticos, inicialmente por el color y la textura. Esta última varía entre arcillosa y arena fina, predominando limos y arcillas (90,4%)
- Todas las propiedades (físicas e hidráulicas) tienen una variación

importante, inclusive al interior de un mismo horizonte, como resultado de los cambios laterales de facies.

- La gravedad específica, entre 2,0 y 2,7, demuestra que mineralógicamente las cenizas están constituidas por fases de ácidas a intermedias. Para la columna estratigráfica propuesta existe un incremento progresivo, horizonte a horizonte, de la gravedad específica con la profundidad.

- El horizonte *Light Olive Gray* (H4) aparece como el horizonte más permeable en promedio de la secuencia estratigráfica propuesta para las cenizas, con una permeabilidad media de $4,22E-05$ cm/s.
- Entre la humedad retenida a 15,0 bares y la humedad a 0,3 bares, en la zona de estudio, existe una relación lineal con un ajuste de $R^2 = 0.95$ y ecuación de la recta: $y = 0,63x - 5,67$.
- Las propiedades analizadas, físicas e hidráulicas, presentan un cambio brusco en su comportamiento a la altura del tercer horizonte, lo que muestra, de manera indirecta, la presencia de materiales provenientes de mínimo dos erupciones volcánicas diferentes en la zona de estudio.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos al personal de los laboratorios de Geotecnia y Ensayos Petrofísicos Especiales de la Facultad de Minas y del laboratorio de Riegos y Drenajes de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BUOL, S. W., HOLE, F. D. & McCracken, R. J. Génesis y clasificación de suelos. Trillas, México, 1990. 417p.
2. HIDRAMSA. Estudio y reglamentación de las llanuras de inundación del río Negro y la quebrada La Pereira. Estudio geológico y geomorfológico realizado para CORNARE y el municipio de Rionegro. Escala 1:25.000. 1997
3. HOYOS, F., VÉLEZ, M. V., MÚNERA, J. C. Y ARIAS, D. E., Investigación de aguas subterráneas Región Valles de San Nicolás, Fase II. 2001. Convenio de cooperación en ciencia y tecnología CORNARE - Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. 85 p.
4. IGAC. Propiedades físicas de los suelos. 1990. Santafé de Bogotá
5. JARAMILLO, D. F., PARRA, L. N. y GONZÁLEZ, L. H. El recurso suelo en Colombia: Distribución y evaluación. Instituto de Ciencias Naturales y Ecología (ICNE), Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 1994. 88p.
6. MASORA. Anuario estadístico subregional, Altiplano de Rionegro. 1996, p 1 - 15.
7. PAGE, W.D. & JAMES, M., The antiquity of the erosion surfaces and Late Cenozoic Deposits, 1981, Memoria del Primer Seminario sobre el Cuaternario de Colombia, Revista CIAF, 6, 1-3, pp 421 453, Bogotá.
8. RESTREPO, J. J. Y TOUSSAINT, J. F. El grupo Ayurá - Montebello: Tiene todavía validez estratigráfica? Memorias Seminario Gerardo Botero Arango, Geología de la Cordillera Central de Colombia. Medellín. 1987. Pp.167 - 173.
9. TORO, G. y HERMELIN, M. Tefraestratigrafía Colombiana. I Etapa Tefraestratigrafía del Departamento de Antioquia. Universidad Eafit Medellín. 1989. 164p.
10. VERA, C. A., Variación en la permeabilidad y en las condiciones de infiltración de las cenizas volcánicas de los valles de San Nicolás. 2001. Tesis de Maestría, Universidad EAFIT. 253 p.