

# Efectos de la meteorización en las propiedades de retención de humedad de dos suelos residuales derivados de una granodiorita

Jorge Arturo Pineda Jaimes\* / Julio Esteban Colmenares Montañez\*\*

## RESUMEN

Se presentan los resultados de una investigación experimental enfocada al entendimiento de los efectos que tiene la meteorización sobre las propiedades de retención de humedad de suelos residuales y saprolíticos provenientes de una granodiorita de la cordillera central de Colombia. Se encontró que la relación succión-humedad depende preponderantemente de la fábrica de los materiales. Los resultados resultan relevantes en el entendimiento del mecanismo de infiltración de agua en laderas meteorizadas.

**Palabras clave:** meteorización, suelos residuales, saprolitos, succión matricial, microestructura, fábrica, suelos parcialmente saturados, valor de entrada de aire.

## WEATHERING EFFECTS ON HUMIDITY RETENTION PROPERTIES IN TWO RESIDUAL SOILS DERIVED FROM GRANODIORITE

### ABSTRACT

This article presents the results of an experimental research focused to understand the weathering effects on humidity retention properties of residual and saprolitic soils from granodiorite in the Colombian central range. It was observed that the suction – humidity relationship strongly depends on material factory. These results are relevant to the understanding of rainfall infiltration process on weathered slopes.

**Key words:** Weathering, Residual Soils, Saprolites, Matrix suction, Microstructure, Factory, Unsaturated Soils, Air entry value.

\* Candidato a Doctor en Ingeniería – Geotecnia, Universidad Nacional de Colombia. Correo electrónico: jpinedaj@unal.edu.co

\*\* Profesor Asociado – Universidad Nacional de Colombia. Correo electrónico: jecolmenaresm@unal.edu.co

Fecha de recepción: 18 de octubre de 2007.

Fecha de aceptación: 30 de enero de 2008.

## INTRODUCCIÓN

Los suelos residuales, cuya formación se asocia, a la meteorización de rocas de diferentes orígenes geológicos, se localizan frecuentemente en zonas de clima tropical en donde es posible encontrar perfiles de meteorización de decenas de metros de espesor. El entendimiento adecuado de las propiedades mecánicas de los suelos residuales, constituye un aspecto fundamental en el diseño y posterior construcción de obras de infraestructura.

En Colombia, en las cordilleras central y occidental, existen suelos residuales derivados de rocas ígneas (principalmente granodioritas y gabros) y de rocas metamórficas (anfibolitas, gneiss y filitas) cuyos horizontes pueden alcanzar varios metros de espesor (Hermelin y García, 2006). En estos materiales, correspondientes a la parte más superficial del perfil de meteorización, es común el desarrollo de fenómenos de remoción en masa, principalmente flujos de detritos y deslizamientos superficiales, generados después de la acción de lluvias intensas. De la misma forma, es común encontrar taludes de altas pendientes (superiores a 50°) relativamente estables, debido probablemente al efecto de la cementación del esqueleto mineral y al efecto de las fuerzas capilares (v.gr. influencia de la succión matricial) en la estabilidad de la microestructura del material (Pineda-Jaimes, 2006).

Diversos autores han reconocido la influencia que tiene la intensidad de meteorización en la fábrica y microestructura de suelos residuales y saprolitos (Mitchell y Sitar, 1982; Vanapalli *et al.*, 1999). Específicamente, las relaciones succión-humedad, las cuales se emplean frecuentemente en la modelación de problemas de infiltración en laderas, se ven profundamente afectadas por estas variables (Rahardjo *et al.*, 2004). Sin embargo, su estudio en Colombia ha recibido relativamente poca atención hasta el momento (Pineda-Jaimes, 2006).

Este artículo presenta los resultados de una investigación enfocada al entendimiento de los efectos que tiene la meteorización, sobre las relaciones succión-humedad de dos suelos residuales colombianos. Para determinar las curvas de retención de humedad de los materiales estudiados, se empleó la técnica del papel de filtro (Ridley *et al.*, 2003), en un intervalo de succiones variables entre 100k Pa y 25 MPa.

## ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza en el departamento de Antioquia, al noroccidente de Colombia, en inmediaciones del municipio de Barbosa, aproximadamente a 60 km al norte de la ciudad de Medellín. En esta zona, afloran principalmente formaciones cretácicas meteorizadas provenientes de rocas ígneas intrusivas (principalmente granitos y granodioritas). En esta región se han construido presas de tierra de altura considerable, como parte de las obras de infraestructura de interconexión eléctrica de Colombia. De la misma forma, se han desarrollado varios proyectos viales que involucran la realización de cortes importantes en el perfil de meteorización. Por este motivo, se escogieron materiales residuales típicos de esta zona para el estudio de las relaciones intensidad de meteorización-succión-humedad.

## MATERIALES OBJETO DE ESTUDIO

Los materiales objeto de estudio, corresponden a suelos residuales y saprolitos con diferentes intensidades de meteorización (Pineda-Jaimes, 2006) obtenidos de los horizontes de un perfil de alteración típico de 20 m de profundidad que proviene de la descomposición de una granodiorita de textura fanerítica, correspondiente a la formación denominada Batolito Antioqueño. Esta formación corresponde a un cuerpo intrusivo de edad cretácica, localizado en el área de estudio, a aproximadamente 1550 m sobre el nivel del mar. En la Tabla 1 se presenta la composición mineralógica de la roca parental.

**TABLA 1. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LA GRANODIORITA DEL BATOLITO ANTIOQUEÑO**



Mineral	% en volumen
Cuarzo	23,9
Plagioclasa (andesina)	48,4
Hornblenda	9,3
Biotita	9,3
Feldespato potásico	6,7
Clorita	1,6
Accesorios	0,8

Fuente: Pineda-Jaimes, 2006.

El material denominado suelo residual, clasifica en el grupo ML del sistema unificado de clasificación de suelos, y puede describirse cualitativamente como un limo rojo arenoso de baja plasticidad, cuya matriz presenta ocasionalmente granos de arena angulares de tamaño variable entre 0,6 y 1 mm. Este horizonte

se extiende desde la superficie del perfil de meteorización hasta una profundidad aproximada de 3 m. Los materiales del horizonte saprolítico, por su parte, puede clasificarse en el grupo SM y corresponde a una arena limosa cuyos granos presentan tamaños variables entre 1,5 y 3 mm, con tonalidades marrones/grises. Este horizonte se extiende entre los 3 y los 7 m de profundidad dentro del perfil de meteorización. Vale la pena mencionar, que estos materiales se ubican en los horizontes cuyos grados de meteorización corresponden a los números V y VI, de acuerdo a la nomenclatura propuesta por Little (1969). En la Tabla 2 se presenta un resumen de las principales propiedades índice de los materiales objeto de estudio, así como una reseña sobre la apariencia del material. En general, la plasticidad de la fracción fina de los suelos provenientes del perfil de meteorización se ubica bajo la línea A de la carta de plasticidad de Casagrande.

**TABLA 2. PROPIEDADES ÍNDICE DE LOS MATERIALES OBJETO DE ESTUDIO**

Material	WL (%)	WP (%)	Gravedad Específica	% Arenas	%Finos	Apariencia Material
Suelo Residual	45,4	28,2	2,62	17,2	82,8	
Saprolito	33,2	24,5	2,69	65,5	34,5	

## ESTUDIOS DE FÁBRICA Y COMPOSICIÓN

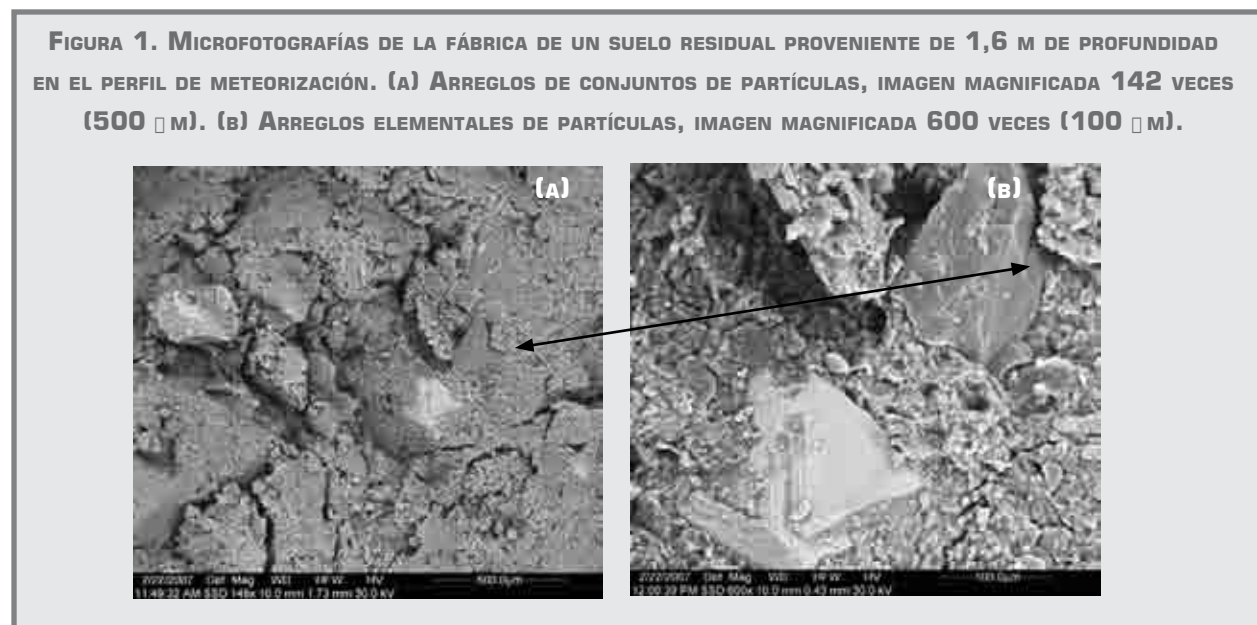
Dado el particular proceso de formación de los suelos residuales y saprolitos objeto de estudio, y teniendo en cuenta que las características de la fábrica y la microestructura de estos materiales están directamen-

te relacionadas con la intensidad de meteorización y pueden controlar las propiedades de retención de humedad, se realizaron observaciones de dichas características mediante el uso de un microscopio electrónico de barrido (tipo SEM) y ensayos de porosimetría de intrusión de mercurio. Para la descripción de las principales características micromorfológicas

de la fábrica de los materiales, se emplearon los criterios propuestos por Collins y McGown (1974). Las observaciones de fábrica, se complementaron con la interpretación del espectro químico de los materiales, hallado mediante la técnica EDX (Energy Dispersive X-Ray), con el fin de obtener un primer acercamiento a la composición de los materiales. A continuación se presentan los resultados más relevantes de los ensayos citados.

En la Figura 1 se presentan dos microfotografías que muestran, por una parte, la disposición del arreglo de algunos conjuntos de partículas y, por otra, la disposición de arreglos elementales en la matriz, corres-

pondientes al suelo residual. En la fotografía 1(a), magnificada 148 veces, se pueden observar algunas partículas subangulares, principalmente de cuarzo y mica, embebidas en una matriz relativamente masiva de partículas del tamaño del limo. Los poros intraensamble no presentan una forma definida y su volumen es relativamente pequeño en relación con el de las partículas minerales. Con el fin de profundizar en la naturaleza de los contactos entre las partículas sólidas angulares y la matriz limosa, la fotografía 1(b), aumentada 600 veces, presenta la perspectiva de una partícula de cuarzo y su disposición en dicha matriz (flecha indicativa). La Figura 2 muestra el espectro químico de los elementos predominantes de la Figura 1(a).



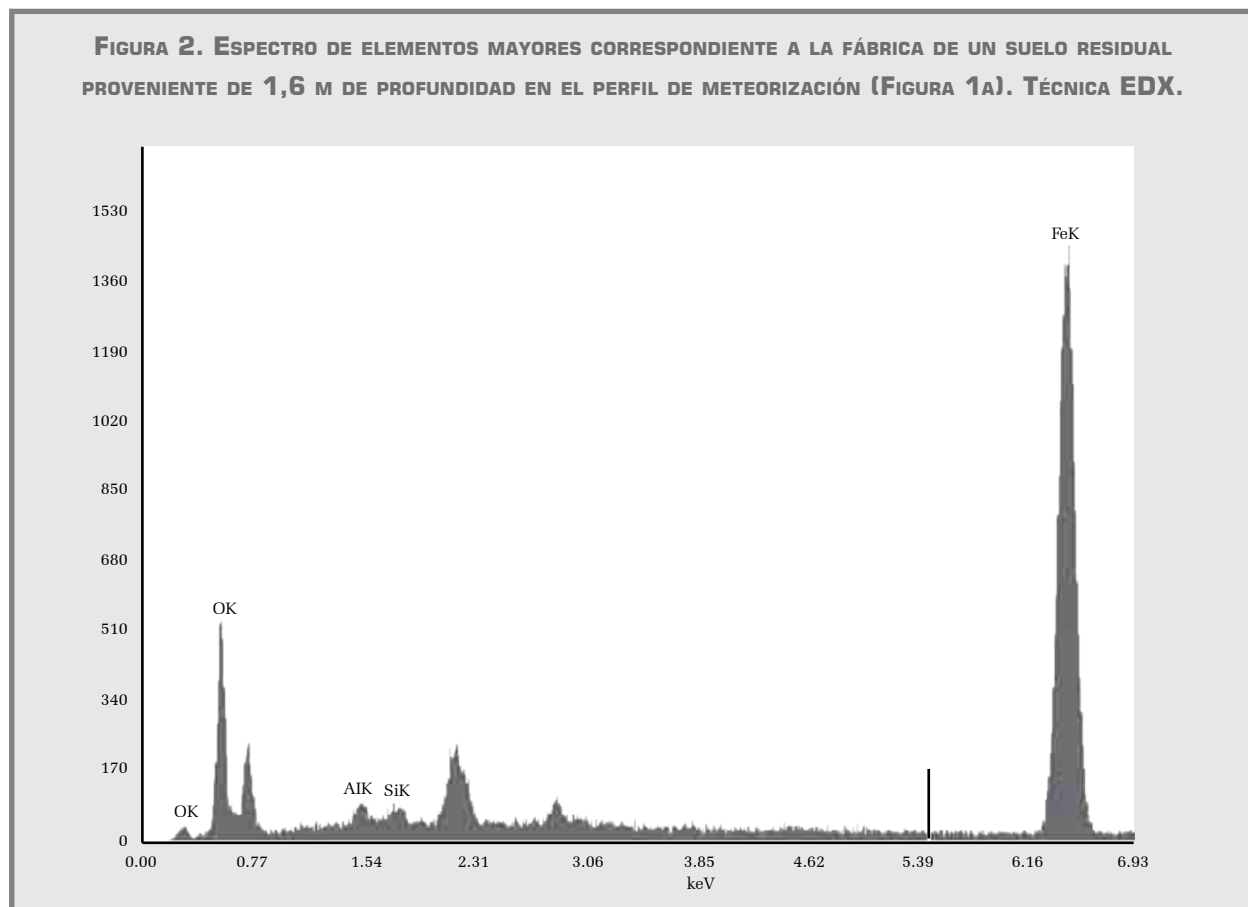
En la Figura 2, los picos predominantes son, en orden de intensidad: el hierro, el oxígeno, el aluminio y el silicio. Esto sugiere la presencia predominante de óxidos de hierro en la matriz del suelo residual, la cual contiene las partículas de cuarzo mostradas en la Figura 1. Lo anterior es consistente con las características texturales del material.

En la Figura 3 se muestran microfotografías de la matriz de una muestra de saprolito proveniente de 5,6

m de profundidad. En la Figura 3(a), aumentada 1000 veces, se muestran poros transensamble alargados y sub-redondeados (ver flechas indicativas), existentes entre conjuntos de partículas. Los poros alargados sugieren planos preferenciales por los cuales se desarrollaron alguna vez los procesos de meteorización física, facilitando la descomposición química de los minerales primarios de la roca parental. Nótese que los arreglos de partículas involucran diferentes tamaños y no se discierne la predominancia de partículas

angulares de cuarzo (al menos en la muestra analizada). En la microfotografía de la Figura 3(b) se presenta la morfología de partículas de caolinita, relativamente bien cristalizadas (círculos blancos), rodeadas por partículas amorfas, de menor tamaño (círculos blancos punteados), correspondientes a una primera etapa de formación de los óxidos de hierro presentes en el suelo residual. Nótese que los poros interensamble son relativamente escasos, lo que sugiere que

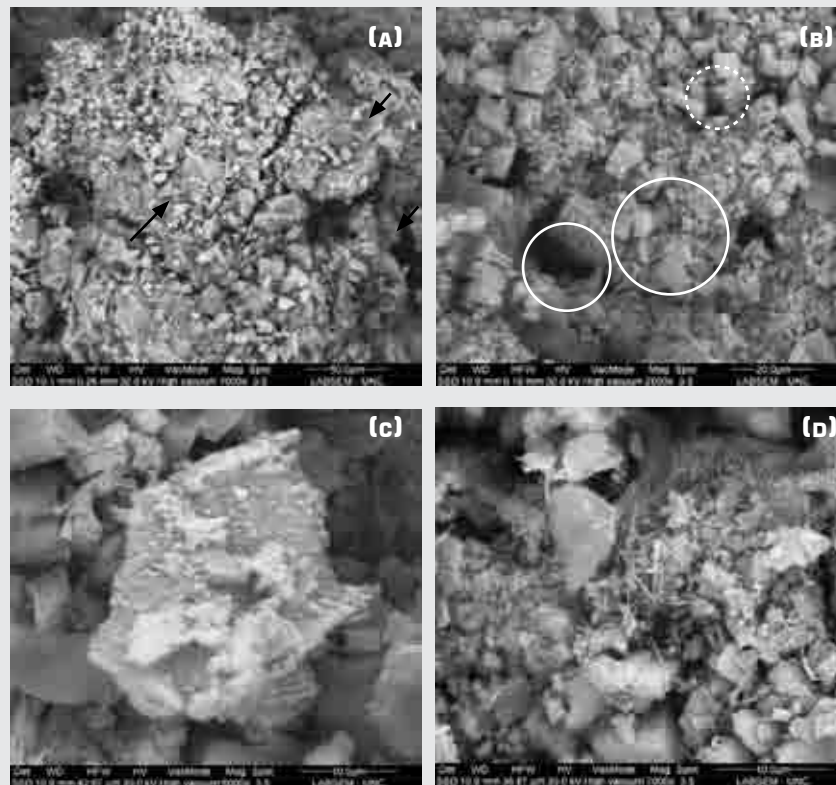
la matriz del suelo está conformada principalmente por el contacto entre partículas de caolinita y nódulos de óxidos. En las imágenes de las figuras 3(c) y 3(d), aumentadas 6000 y 7000 veces respectivamente, se muestra la naturaleza de dichos contactos. En la Figura 3(c) se presenta la perspectiva de un feldespato en proceso de caolinitización y en la Figura 3(d) se muestra una matriz heterogénea, típica de estados de meteorización intermedios (Rigo, 2005).



La Figura 4 presenta el espectro químico determinado para la microfotografía de la Figura 3(a). Los picos predominantes son, en orden de intensidad: aluminio, silicio, hierro y oxígeno. A diferencia del espectro químico del suelo residual, el hierro evidencia

un pico inferior al del aluminio y el silicio, por lo cual, es probable que en el saprolito la magnitud de la oxidación de los minerales ferromagnesianos de la roca parental corresponda a una etapa intermedia del proceso de meteorización.

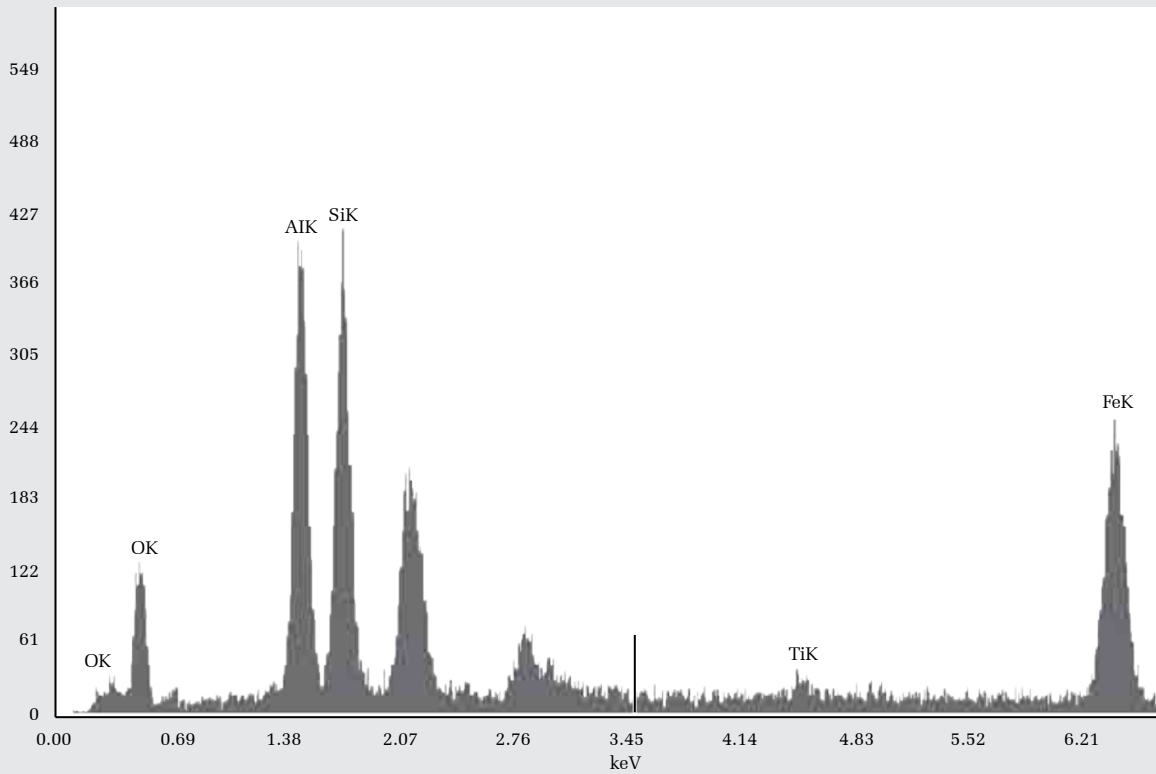
**FIGURA 3. MICROFOTOGRAFÍAS DE LA FÁBRICA DE UN SAPROLITO A 5,6 M DE PROFUNDIDAD EN EL PERFIL DE METEORIZACIÓN. (A) ARREGLOS DE CONJUNTOS DE PARTÍCULAS, IMAGEN MAGNIFICADA 1000 VECES (50  $\mu$ m). (B) ARREGLOS ELEMENTALES DE PARTÍCULAS, IMAGEN MAGNIFICADA 2000 VECES (20  $\mu$ m). (C) CONTACTOS EN UNA PARTÍCULA SEMIANGULAR DE LA MATRIZ, IMAGEN MAGNIFICADA 6000 VECES (10  $\mu$ m). (D) NATURALEZA DE LOS CONTACTOS SOBRE LA PARTÍCULA. IMAGEN AUMENTADA 7000 VECES (10  $\mu$ m).**



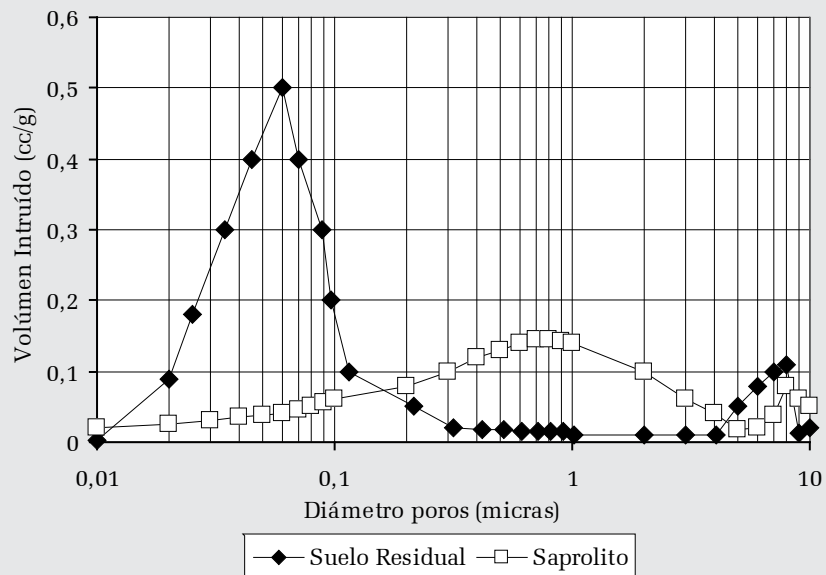
De manera complementaria a las observaciones micromorfológicas, se realizaron ensayos de porosimetría de intrusión de mercurio con el fin de estudiar la distribución de los tamaños de los poros de la matriz de los materiales. Los resultados se muestran en la Figura 5. Se determinó que en el suelo residual analizado, se presenta principalmente, una distribución bimodal de microporos cuyo tamaño predominante es 0,06 micras. En el saprolito se encuentra una distribución igualmente bimodal de microporos,

para la cual el tamaño predominante es 0,8 micras. Lo anterior pone de manifiesto que la intensidad de meteorización tiene un efecto marcado en el tamaño de los intersticios presentes en la fábrica de los materiales; es decir, los resultados sugieren que mientras mayor sea la descomposición en relación con la roca parental, menor es el tamaño de los poros del suelo. Este hecho posee importantes implicaciones en las propiedades de retención de humedad, como se mencionará posteriormente.

**FIGURA 4. ESPECTRO DE ELEMENTOS MAYORES CORRESPONDIENTE A LA FÁBRICA DE UN SAPROLITO DE 5,6 M DE PROFUNDIDAD EN EL PERFIL DE METEORIZACIÓN (FIGURA 3A). TÉCNICA EDX.**



**FIGURA 5. ENSAYOS DE POROSIMETRÍA DE INTRUSIÓN DE MERCURIO EN LOS MATERIALES OBJETO DE ESTUDIO**



## PROPIEDADES DE RETENCIÓN DE HUMEDAD

Con el fin de obtener un primer acercamiento sobre las consecuencias de la meteorización en las propiedades de retención de humedad de los materiales objeto de estudio, se seleccionaron muestras de suelo residual (limo arenoso color rojo) y muestras de saprolito (arena limosa de trazas ocre-blancas) de diferentes profundidades dentro de los horizontes del perfil de meteorización. Se presentarán aquí los resultados detallados correspondientes a muestras extraídas a 2,1 m y a 5,6 m de profundidad, en el horizonte de suelo residual y el horizonte saprolítico, respectivamente.

Las relaciones succión matricial-humedad se determinaron para diferentes etapas de equilibrio de humedad, principalmente en trayectorias de secado. La succión matricial fue determinada mediante la técnica del papel de filtro en contacto con la muestra (Ridley *et al.*, 2003; Pineda-Jaimes, 2003). El papel filtro empleado fue el Whatman No. 42.

En general, las muestras estudiadas poseen diámetros variables entre 5 y 6,5 cm, y alturas aproximadas de 2 cm; estas muestras fueron extraídas manualmente mediante tallado de los bloques obtenidos en las trincheras. En la Tabla 3 se presentan las condiciones iniciales de las muestras estudiadas para las dos profundidades mencionadas anteriormente.

**TABLA 3. PROPIEDADES INICIALES DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS RELACIONES SUCCIÓN MATRICIAL-HUMEDAD Y SUCCIÓN MATRICIAL-COMPORTAMIENTO VOLUMÉTRICO.**

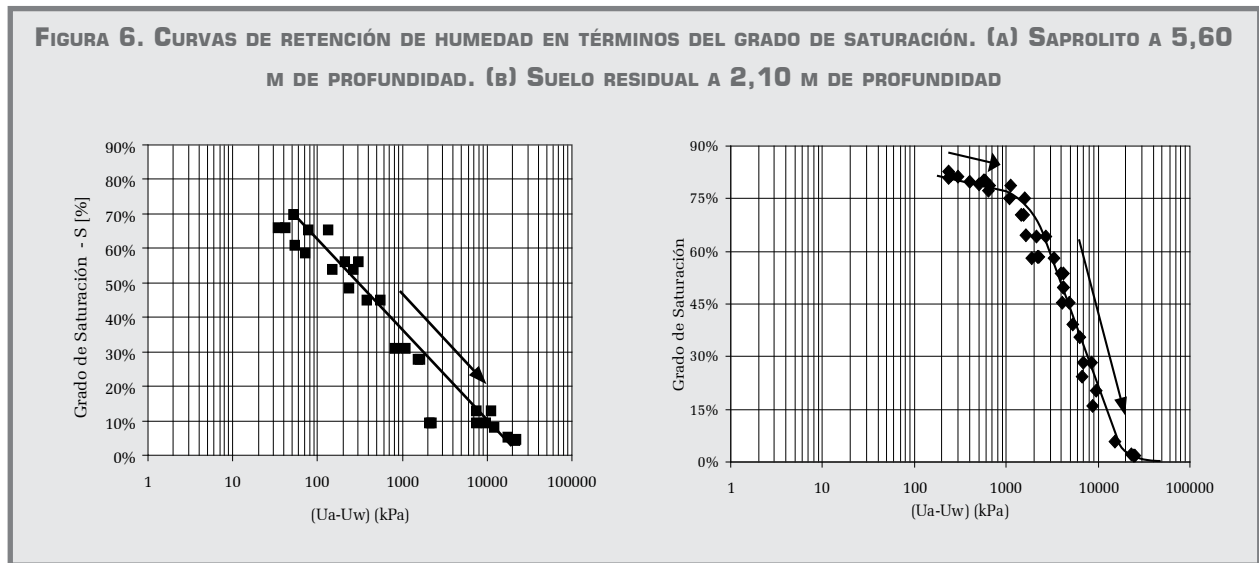
Espécimen	Descripción/	Profundidad [m]	Contenido de humedad gravimétrico W [%]	Relación de Vacíos [e]	Grado de Saturación S [%]	Succión Matricial (kPa)
M1SR	Suelo Residual	2,1	31,5	1,06	81	760,1
M2SR	Suelo Residual	2,1	31,9	1,08	82	767,5
M3SR	Suelo Residual	2,1	31,4	1,05	80	369,7
M4SR	Suelo Residual	2,1	30,8	1,04	76	355,4
M1SP	Saprolito	5,6	28,1	1,19	61	54,1
M2SP	Saprolito	5,6	28,6	1,04	70	56,2
M3SP	Saprolito	5,6	28,7	1,05	70	112,4

Vale la pena mencionar que la humedad gravimétrica relacionada en la Tabla 3 corresponde a la humedad natural. La densidad seca inicial de las muestras de suelo residual en estas condiciones oscila entre 1,35 g/cm<sup>3</sup> y 1,37 g/cm<sup>3</sup>. Para el saprolito, la densidad seca inicial varía entre 1,38 g/cm<sup>3</sup> y 1,40 g/cm<sup>3</sup>. Los mate-

riales estudiados se encuentran parcialmente saturados en su condición natural. La Figura 6 muestra las curvas de retención de humedad en secado en términos del grado de saturación, para el suelo residual y para el saprolito en estado natural.



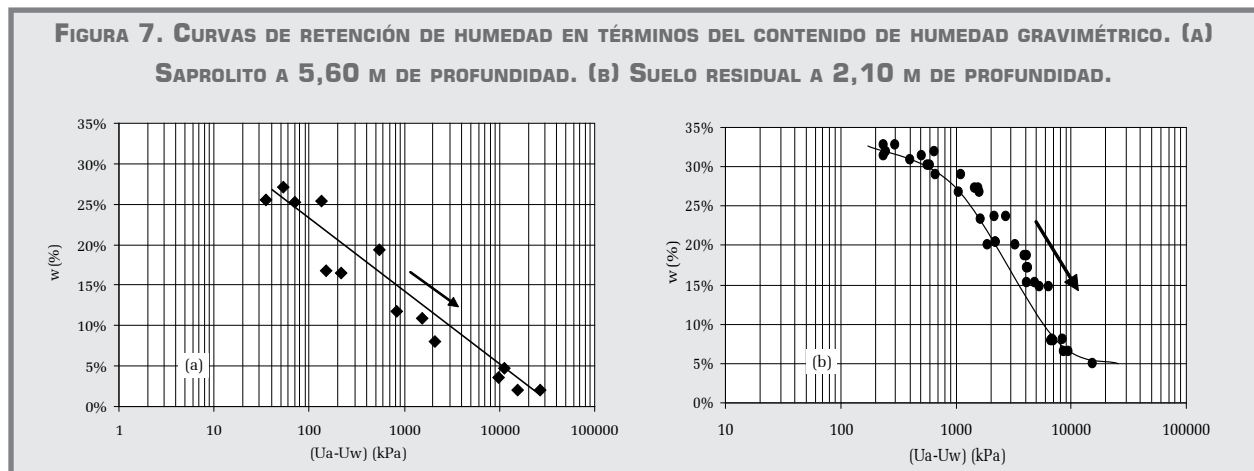
**FIGURA 6. CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD EN TÉRMINOS DEL GRADO DE SATURACIÓN. (A) SAPROLITO A 5,60 M DE PROFUNDIDAD. (B) SUELO RESIDUAL A 2,10 M DE PROFUNDIDAD**



Para el suelo residual, se puede identificar un punto de inflexión marcado en la curva de retención, para un grado de saturación aproximado del 78% y una succión matricial cercana a 1200 kPa. Este punto podría interpretarse, eventualmente, como el punto en el cual se localiza el valor de entrada de aire (V.A.E.) de ese material, considerando la tendencia a la disminución constante del grado de saturación que sugieren los puntos ubicados antes de dicha succión. Nótese que el grado de saturación disminuye rápidamente a partir del punto de inflexión, comportamiento que se asocia a la continua desaturación de los poros del material. Para el saprolito, el grado de saturación disminuye de manera progresiva mostrando una tendencia lineal.

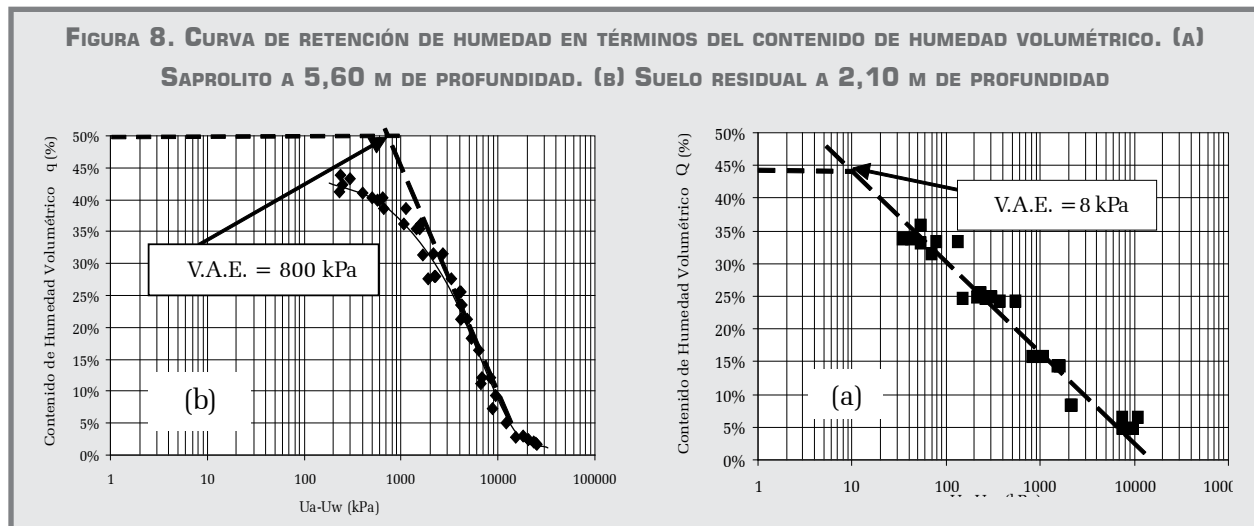
Para grados de saturación variables entre el 30 y el 60%, la succión matricial desarrollada en el suelo residual es hasta nueve veces superior a la generada en

el saprolito. Para éste último material, las succiones cercanas a 10 Mpa se alcanzan para grados de saturación menores al 10%. Estas diferencias en la magnitud de la succión matricial para grados de saturación similares, indican claramente que el tamaño de los poros de la matriz del suelo residual es menor al correspondiente al saprolito, probablemente como una consecuencia de la meteorización. Lo anterior, coincide con los resultados de los ensayos de porosimetría de intrusión de mercurio presentados en la Figura 5. Por su parte, la Figura 7 presentan las curvas de retención de humedad en términos del contenido de humedad gravimétrico. La tendencia que se observa es similar a la descrita anteriormente en términos del grado de saturación. La disminución del contenido de humedad tanto en el saprolito como en el suelo residual se realiza progresivamente, de manera lineal, a partir del valor correspondiente a la condición natural.



La pendiente de la curva correspondiente al suelo residual para un ciclo logarítmico de succión matricial, es aproximadamente 0,20; mientras que para el saprolito se aproxima a 0,14. La succión matricial requerida para disminuir el contenido de humedad en el suelo residual es claramente superior que para el saprolito. Este comportamiento puede explicarse probablemente en función del tamaño de los poros de los materiales en estudio, para el saprolito, en donde la intensidad de meteorización es inferior, los poros poseen un mayor tamaño que los correspondientes al suelo residual. Así mismo, nótese que para contenidos de humedad inferiores al 25%, la succión en el suelo residual es hasta cinco veces mayor que en el saprolito, probablemente por las razones antes expuestas.

En la Figura 8 se muestran las curvas de retención de humedad en términos del contenido de humedad volumétrico para el saprolito y el suelo residual. El comportamiento que presentan las curvas es análogo al presentado en términos de la humedad gravimétrica. En este caso, en cada una de las gráficas se han trazado las líneas tendientes a definir el valor de entrada de aire (V.A.E.) de los materiales, siguiendo la metodología sugerida por Vanapalli *et al.* (1999), ya que éste se considera un parámetro importante de las curvas de retención que sin duda ha sido afectado por la meteorización. En el caso del saprolito, el valor de entrada de aire se establece en 8 kPa, aproximadamente, mientras que en el suelo residual el valor de entrada de aire se encuentra aproximadamente en 800 kPa.



Los valores de entrada de aire determinados mediante este método gráfico son coherentes a los reportados por Aubertin *et al.* (1998): 3,6 kPa - 7,5 kPa para arenas medias a finas y más de 25 kPa para limos y arcillas. En este sentido, de manera complementaria a lo presentado, en la Tabla 4 se presentan los (V.A.E.) determinados para suelos residuales y saprolitos de otras profundidades en el perfil de meteorización.

**TABLA 4. VALORES DE ENTRADA DE AIRE (V.A.E.) PARA SUELOS RESIDUALES Y SAPROLITOS PARA OTRAS PROFUNDIDADES DENTRO DEL PERFIL DE METEORIZACIÓN.**

Descripción	Profundidad (m)	Valor de Entrada de Aire (kPa)
Suelo Residual	1,6	1165
Suelo Residual	2,8	695
Saprolito	4,2	12
Saprolito	6,5	4

## INTENSIDAD DE METEORIZACIÓN

Debido a que la meteorización implica cambios predominantemente químicos en la composición de la roca parental, los cuales se reflejan en la composición de los materiales de los diferentes horizontes del perfil de meteorización, diversos autores han propuesto índices químicos para cuantificar la intensidad de meteorización, mediante el análisis de las variaciones de los elementos mayores en el perfil. En el desarrollo de la presente investigación, se consideró la determinación del índice de meteorización de Parker (1970), el cual es uno de los más representativos para los materiales objeto de estudio (Pineda-Jaimes, 2006). Este índice considera que los elementos de mayor movilidad durante el proceso de meteorización (y por lo tanto los más inestables desde el punto de vista químico) son el sodio, el calcio, el potasio y el magnesio. Su valor está definido por la ecuación 1.

$$WP = \left[ \frac{2Na_2O}{0.35} + \frac{MgO}{0.9} + \frac{2K_2O}{0.25} + \frac{CaO}{0.7} \right] \times 100 \quad (1)$$

En la Figura 10 se presenta la tendencia del índice de meteorización con la profundidad relativa al perfil de meteorización.

Se observa que el valor del índice WP disminuye marcadamente a medida que aumenta la intensidad de meteorización, en forma coincidente con las tendencias reportadas en la literatura (v.gr. Irfan, 1997; Aristizábal *et al.*, 2005).

## RELACIONES INTENSIDAD DE METEORIZACIÓN - VALOR DE ENTRADA DE AIRE

Con el fin de obtener una visión general sobre la influencia que ejerce la intensidad de meteorización en las propiedades de retención de humedad, se estimó la correlación entre el índice WP y el V.E.A. para los suelos residuales y saprolitos estudiados (Figura 11). Se observa que a medida que el índice WP decrece, el V.E.A. aumenta. En otras palabras, a medida que la intensidad de meteorización se hace mayor, la succión matricial necesaria para la desaturación de los suelos se hace mayor, en razón a la marcada disminución del diámetro de los intersticios de la fábrica de los materiales.

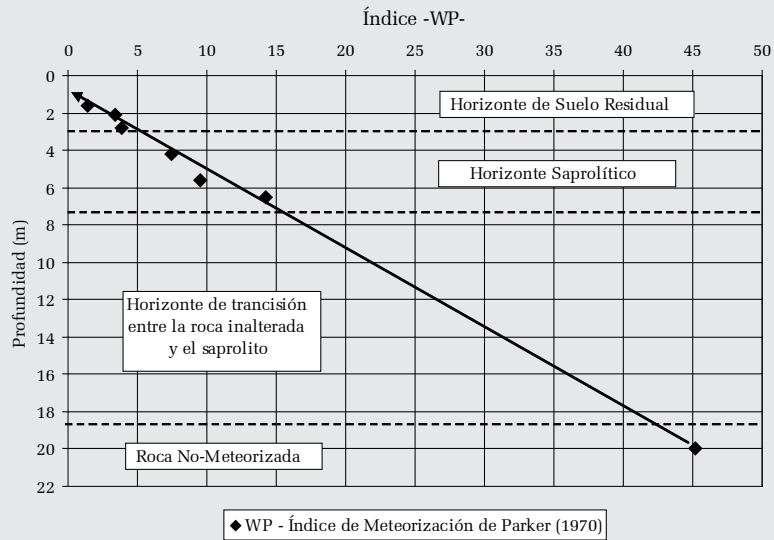
## CONCLUSIONES

Los suelos estudiados se encuentran parcialmente saturados. Esta condición es inherente al proceso de formación de estos materiales. La succión matricial en el suelo residual es ostensiblemente mayor que en el saprolito, en condiciones de humedad natural. Esto sugiere que la capacidad de retención de agua en el saprolito es inferior a la correspondiente al suelo residual. Lo anterior se debe a los cambios de la fábrica y la textura de los materiales debidos a la acción de la meteorización en el tiempo geológico.

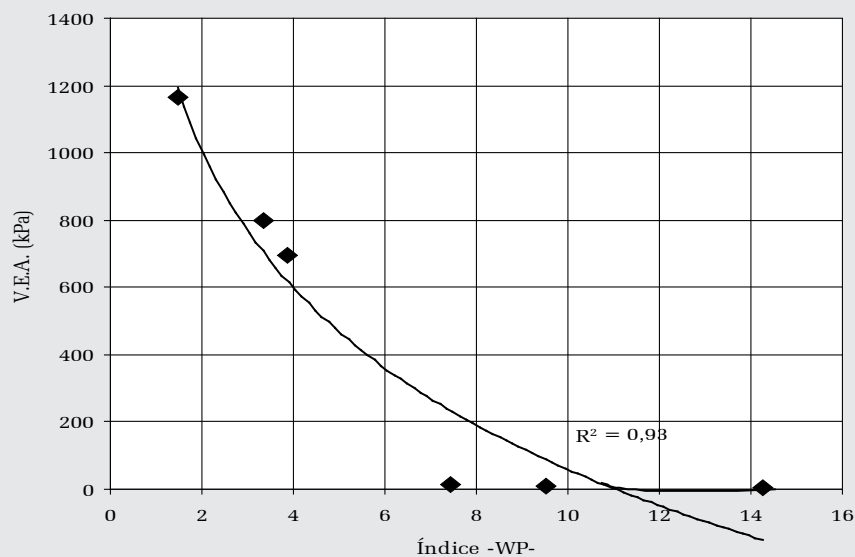
Para grados de saturación y contenidos de humedad similares, la succión desarrollada en el proceso de secado por el suelo residual es visiblemente mayor que para el saprolito, como una consecuencia de la

disminución del tamaño promedio de los intersticios de la matriz del primero, debida a la intensidad de meteorización. Lo anterior se refleja también en las relaciones entre el V.E.A. y el índice WP.

**FIGURA 10. VARIACIÓN DEL ÍNDICE DE METEORIZACIÓN DE PARKER CON LA PROFUNDIDAD EN EL PERFIL DE METEORIZACIÓN EN ESTUDIO. LA FLECHA INDICA LA DIRECCIÓN EN LA QUE AUMENTA LA INTENSIDAD DE METEORIZACIÓN.**



**FIGURA 11. RELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE METEORIZACIÓN DE PARKER (WP) Y EL VALOR DE ENTRADA DE AIRE DE LOS SUELOS RESIDUALES Y SAPROLITOS ESTUDIADOS**



## BIBLIOGRAFÍA

- Aristizábal, E., Roser, B., Yokota, S. "Tropical chemical weathering of the Aburrá valley, northern Colombia Andes". *Engineering Geology* (2005): 389 - 406.
- Aubertin, M., Ricard, J. & Chapuis, R. "A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines". *Canadian Geotechnical Journal* 35. (1998): 55 - 69.
- Collins, K. y McGown, A. "The form and function of microfabric features in a variety of natural soils". *Geotechnique* 24. 2. (1974).
- Ferreira, M. "Estudo de um solo residual do arenito da rodovia RS-239, ensaios triaxiais servo-controlados". Tese de doutorado em engenharia Universidade do Rio Grande do sul, Brasil. 2005.
- Hermelin, M. y García, C. "Cálculo preliminar de la tasa de meteorización del batolito Antioqueño, cordillera central, Colombia". Universidad Eafit, Grupo de Geología e Ingeniería Sísmica. 2006.
- Irfan, T.Y. "Mineralogical and fabric characterization and classification of weathered volcanics rocks in Hong-Kong". *Georeport* 66. Geotechnical Control Office, Civil Engineering Department. (1997).
- Little, A. "The engineering classification of residual soils", Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ISSMFE. Mexico. (1969): 1 - 10.
- Mitchell, J. y Sitar, N. "Engineering properties of tropical residual soils". *Proceedings of the ASCE specialty conference on engineering and construction in tropical and residual soils*. Honolulu. (1982): 30 - 57.
- Parker, A. "An index of weathering for silicate rocks". *Geological Magazine* 107. (1970): 501 -504.
- Pineda-Jaimes, J. "Comportamiento volumétrico de una arcilla de la Sabana de Bogotá en procesos de secado" Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería- Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2003.
- . "Perfiles de Meteorización, fábrica y microestructura de suelos residuales: reporte interno". Programa de Doctorado en Ingeniería - Geotecnia, Universidad Nacional de Colombia. 2006.
- Radharjo, H., Aung, K., Leong, E. y Rezaur, R.B. "Characteristics of residual soils in Singapore as formed by weathering". *Engineering Geology* 73. (2004): 157 - 169.
- Ridley, A. Dineen, K., Burland, J. y Vaughan, P. "Soil matrix suction: some examples of its measurement and applications in geotechnical engineering". *Geotechnique* 53. 2. (2003): 251 - 253.
- Rigo, M. "Mineralogia, intemperismo e comportamento geotécnico do solos saprolíticos de rochas vulcânicas da formação serra geral". Tese de doutorado em engenharia Universidade do Rio Grande do sul, Brasil. 2005.
- Vanapalli, S., Fredlund, D. & Pufahl, D. "The influence of soil structure and stress history on the soil- water characteristics of a compacted till". *Geotechnique* 49.2. (1999): 143 - 159.