
CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE PERFILES DE METEORIZACIÓN DESARROLLADOS SOBRE ROCAS ÍGNEAS EN AMBIENTES TROPICALES

GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION OF WEATHERING PROFILES DEVELOPED ON IGNEOUS ROCKS IN TROPICAL ENVIRONMENTS

Edier Aristizábal¹, Yamile Valencia², Alexander Guerra², Marcela Vélez² & Oscar Echeverri²

1. Equipo Ambiental - Gerencia Producción de Energía, ISAGEN S.A.E.S.P., evaristizabal@isagen.com.co

2. Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín

Recibido para evaluación: 13 de Septiembre de 2011 / Aceptación: 30 de Octubre de 2011 / Recibida versión final: 18 de Noviembre de 2011

RESUMEN

La meteorización se define como la alteración y transformación de la roca en suelo por procesos físicos y químicos. En ambientes tropicales como el Valle de Aburrá (Medellín, Colombia), caracterizado por altas precipitaciones durante todo el año, dominan los procesos químicos formando profundos perfiles de meteorización. El presente artículo corresponde a la caracterización del suelo residual y saprolito de dos perfiles de meteorización derivados de rocas ígneas plutónicas y volcánicas en el Valle de Aburrá bajo un ambiente tropical húmedo. Inicialmente se describió y diferenció en campo el perfil de meteorización y se tomaron muestras alteradas e inalteradas, a las cuales, para cada horizonte, se les realizaron ensayos de laboratorio de color, humedad, granulometría de gruesos y finos, límites de consistencia, clasificación MCT, compresión simple, succión y corte directo. Los resultados reflejaron una fuerte relación entre la succión y la resistencia de los perfiles, lo cual refleja la importancia que la estructura y la succión tienen en el comportamiento mecánico de estos materiales en nuestra región. Es importante continuar con una detallada caracterización de los diferentes materiales que conforman las laderas del Valle de Aburrá con el objeto de desarrollar modelos geotécnicos apropiados que correspondan a las condiciones locales de suelos parcialmente saturados del valle, y basados en el entendimiento de los procesos físicos y químicos que dieron lugar a estos materiales.

PALABRAS CLAVE: Valle de Aburrá, meteorización, suelos residuales, parcialmente saturados, succión, Antioquia, Colombia

ABSTRACT

Weathering is defined as the alteration and transformation of rock into soil by physical and chemical processes. In tropical environments, such as the Aburrá Valley (Medellín, Colombia), characterized by high rainfall throughout the year, chemical weathering processes dominate the formation of deep weathering profiles. This paper corresponds to residual soil and saprolite characterization of two weathering profiles derived from plutonic and volcanic igneous rocks in the Aburrá Valley under a humid tropical environment. Initially it was described and differentiated on field the typical weathering profile and it was taken disturbed and undisturbed samples for each horizon and carried out laboratory tests of color, moisture, particle size of coarse and fine, limits of consistency, MCT classification, simple compression, suction, and direct shear tests. The results showed a strong relationship between the suction and shear strength parameters, reflecting the importance of structure and suction has on the mechanical behavior of these materials in our region. It is important to continue with a detailed characterization of the different materials which are part of the slopes in the Aburrá Valley in order to develop appropriate geotechnical models that correspond to local conditions of unsaturated soils in the valley, and based on an understanding of the physical and chemical processes that originated these materials.

KEYWORDS: Aburrá Valley, weathering, residual soils, unsaturated, suction, Antioquia, Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

La meteorización es definida como el proceso de alteración y separación de la roca y materiales del suelo sobre y cerca de la superficie de la Tierra por descomposición química o desintegración física (Anon, 1995). La susceptibilidad de la roca a procesos de meteorización química es función de la mineralogía, textura y presencia de fracturas, aumentando cuando el tamaño del grano es más fino. Sin embargo se considera que el control dominante en el modo de meteorización es la lluvia y la temperatura, al igual que el rápido cambio de dichas variables durante el día (Ollier, 1984). Es por esto que masas rocosas en ambientes tropicales húmedos se caracterizan por la generación de profundos perfiles de meteorización, en algunos casos con horizontes superficiales enriquecidos en óxidos de hierro y aluminio conocidos como lateríticos.

Uno de los primeros intentos por clasificar las rocas meteorizadas para propósitos ingenieriles fue realizado por Moye (1955) y Ruxton & Berry (1957) en rocas graníticas de Australia y Hong Kong, respectivamente. Posteriormente Little (1969) según Fredlund & Rahardjo (1993), propone un perfil típico para suelos tropicales similar a la propuesta de Moye (1955), con límites entre horizontes generalmente no muy claros. Deere & Patton (1971) dividen el perfil en tres horizontes principales, suelo residual (I), roca meteorizada (II) y roca no meteorizada (III). Luego vienen los trabajos de Anon y la Sociedad Geológica del Reino Unido, los cuales se basaron en los trabajos anteriores de Moye (1955) ampliando el uso para todo tipo de roca, por lo cual proponen utilizar el término suelo residual en lugar de suelo granítico. En este sentido, la Institución Británica de Estándares (BS 5930, Anon 1981) recomendó seis divisiones de gradación para el perfil en todo tipo de rocas: roca fresca (I), ligeramente meteorizada (II), moderadamente meteorizada (III), altamente meteorizada (IV), completamente meteorizada (V) y suelo residual (VI). A partir de estos criterios se han realizado diferentes ajustes locales donde sobresalen la Oficina de Control Geotécnico de Hong Kong (GCO, por su siglas en inglés) y Anon (1995). Otros trabajos más recientes han intentado utilizar criterios específicos para la definición de los diferentes grados de meteorización considerando la composición y estructura del suelo, entre ellos sobresalen Wesley & Irfan (1998) quienes proponen un sistema de clasificación para saprolitos y suelos residuales basados en la composición mineralógica y física al igual que la estructura.

De acuerdo con dichas definiciones se puede considerar que el perfil básico de meteorización lo conforman:

- a. Horizontes móviles
- b. La roca meteorizada totalmente
- c. La roca meteorizada parcialmente
- d. La roca fresca

En su conjunto los horizontes A, B y C conforman el denominado *regolito*, donde el horizonte A se caracteriza por su color oscuro, debido a la presencia de abundante materia orgánica, y es el más intensamente afectado por los procesos de disolución, que arrastran sus iones hacia horizontes más profundos, por lo que se le conoce también como horizonte de lixiviación o de lavado (Caballero, 1998). En el horizonte B predomina *el suelo* entendido como la roca totalmente meteorizada, donde el comportamiento está controlado por deformaciones de la masa de suelo, en tanto que en el horizonte C predomina el **material rocoso**, en el que el comportamiento está controlado por el movimiento a lo largo de las discontinuidades del macizo rocoso. Es por esto que entre los horizontes B y C existe una importante zona de transición en términos de comportamiento geotécnico.

La parte superior del horizonte B se caracteriza por la extinción total de la fábrica y estructura de la roca parental donde todo el material se ha convertido a suelo. Para las clasificaciones de la BS 5930 (Anon, 1981) y la Anon (1988)

este nivel corresponde exclusivamente al horizonte VI denominado *suelo residual*, en el cual la roca está completamente meteorizada con un porcentaje menor al 30 % de roca. Voicu & Bardoux (2002) denominan este nivel, caracterizado por la presencia de zonas moteadas, ferricretes o latosol, como *pedolito*. Deere & Patton (1971), siguiendo la convención utilizada en la pedogénesis, definen este nivel como suelo residual clasificado horizonte **IA**, rico en materia orgánica y lixiviación, y horizonte **IB**, el cual está característicamente enriquecido en arcillas y acumulaciones de hierro, aluminio y sílice.

La parte inferior del horizonte B la conforma el denominado *saprolito*, definido como un material blando producto de la meteorización química de las rocas, y caracterizado por la formación de minerales secundarios, en el que la estructura y fábrica originales están preservadas debido al emplazamiento pseudomórfico de los minerales originales sin alteración y transporte subsecuentes. La formación del saprolito es un proceso isovolumétrico pero la mitad de la masa de la roca se pierde por lixiviación de sílice, hierro y bases (Fookes, 1997; Voicu & Bardoux, 2002). Voicu & Bardoux (2002) dividen el saprolito en grueso (**saprorock**), como la zona de transición entre la roca, y el saprolito caracterizado por la preservación de la fábrica de la roca presentando un contenido menor al 20% de productos de la alteración de minerales meteorizados; y saprolito fino (**litomage**), donde no hay minerales primarios pero se conserva la fábrica. Para la clasificación de Deere & Patton (1971) el saprolito corresponde al horizonte **IC**, con menos del 10% de bloques de roca. Para Anon (1990) el saprolito se define como el manto meteorizado que se comporta en general como un suelo en términos geotécnicos y que presenta rasgos texturales y estructurales de la roca madre, y el cual sumado con el horizonte VI conforma el suelo residual tropical, donde las propiedades de la masa y del material son todavía las de un suelo, por debajo de este límite las características de la roca comienzan a dominar en la masa y el material. Para este autor suelo residual tropical definido como el grado VI exclusivamente es muy restrictivo para efectos geotécnicos, ya que gran parte del material descrito normalmente como suelo se encuentra por debajo de este grado en el perfil de meteorización típico.

En ambientes tropicales húmedos por encima de los horizontes B se presentan suelos residuales alterados y altamente meteorizados, bajos en sílica, con una concentración suficiente de sesquióxidos de hierro y aluminio y algún grado de cementación que se denominan lateritas (Blight, 1997). La lateritización representa la etapa final del proceso de meteorización con la formación de sesquióxidos, los cuales corresponden a óxidos, oxidróxidos, hidróxidos (referidos como colectivamente óxidos) de hierro, aluminio y manganeso, que afectan fuertemente las propiedades físicas y químicas del suelo, la morfología y su clasificación (Shaw & West, 2006). Schellmann (1981) define el término laterita como el producto de intensa meteorización subaerial donde el contenido de Fe y Al es mayor y el contenido de sílice es más bajo comparado con la roca parental caolinizada exclusivamente y está compuesto predominantemente de minerales de goethita, hematita, hidróxidos de aluminio, minerales de caolinita y cuarzo.

El presente artículo corresponde a la caracterización del suelo residual y saprolito de dos perfiles de meteorización derivados de rocas ígneas plutónicas y volcánicas en el Valle de Aburrá bajo un ambiente tropical húmedo. Para el levantamiento del perfil de meteorización se combinó la clasificación propuesta por Little (1969) y los criterios definidos por la Anon (1988) y Anon (1995), que permitieran una diferenciación de los niveles en términos cuantitativos y criterios de campo distinguibles. Los términos utilizados para diferenciar los horizontes son: Suelo Residual (RS) que corresponde al grado VI, Completamente Meteorizado (CW) que corresponde al grado V y Altamente Meteorizado (HW) que corresponde al grado IV.

2. LOCALIZACIÓN Y MARCO GEOLÓGICO

El Valle de Aburrá, con un área de 1152 km² y una longitud de 65 km, está localizado en el norte de la cordillera Central. Se extiende aproximadamente entre latitudes 6° 00'N y 6° 30'N y longitudes 75° 15'W y 75° 45'W. Las condiciones climáticas del Valle de Aburrá son típicas de ambientes tropicales, con una temperatura promedio de 22° C, y humedad relativa de 70 %. La condición de lluvia es bimodal, con máximas en los meses de mayo y octubre. Los promedios de lluvias anuales varían desde 1400 mm en la parte central hasta los 2700 mm en el norte y sur del Valle.

Los perfiles estudiados se localizan al sur del Valle de Aburrá, en jurisdicción rural del municipio de Caldas, punto con coordenadas 6,2194 N y 75,5568 W y en la margen oriental del centro del valle, jurisdicción del municipio de Medellín, punto con coordenadas 6,085 N y 75,630 W (ver Figura 1). La toma de muestras se realizó a distintas profundidades sobre taludes expuestos las cuales se presentan en la Tabla 1, y durante el mes de marzo cuando se da inicio a la temporada de lluvias.

Geológicamente el Valle de Aburrá está compuesto de un basamento metamórfico paleozoico, rocas ígneas ultrabásicas, una secuencia volcánico - sedimentaria, cuerpos graníticos intrusivos y depósitos aluviales y de vertiente. El basamento metamórfico, conformado esencialmente por secuencias intercaladas de esquistos, anfibolitas y gneises, fue obducido durante el cretácico por cuerpos de composición dunítica, basaltos y sedimentos de origen marino, con fuerte afectación tectónica. Adicionalmente, tonalitas y granodioritas cretácicas y triásicas de composición ácida a intermedia, intruyen este cuerpo metamórfico. Espesos depósitos derivados de antiguos movimientos en masa, y clasificados como flujos y deslizamientos de escombros y lodos cubren la parte media y baja de las laderas.

Las rocas y depósitos presentan profundos perfiles de meteorización. Los espesores de los perfiles varían significativamente dependiendo de la roca parental y las condiciones locales. En las rocas graníticas, los perfiles de meteorización sobrepasan los 30 m de profundidad; en rocas ultra básicas y metamórficas es delgado, variando entre 10 y 20 m de profundidad.

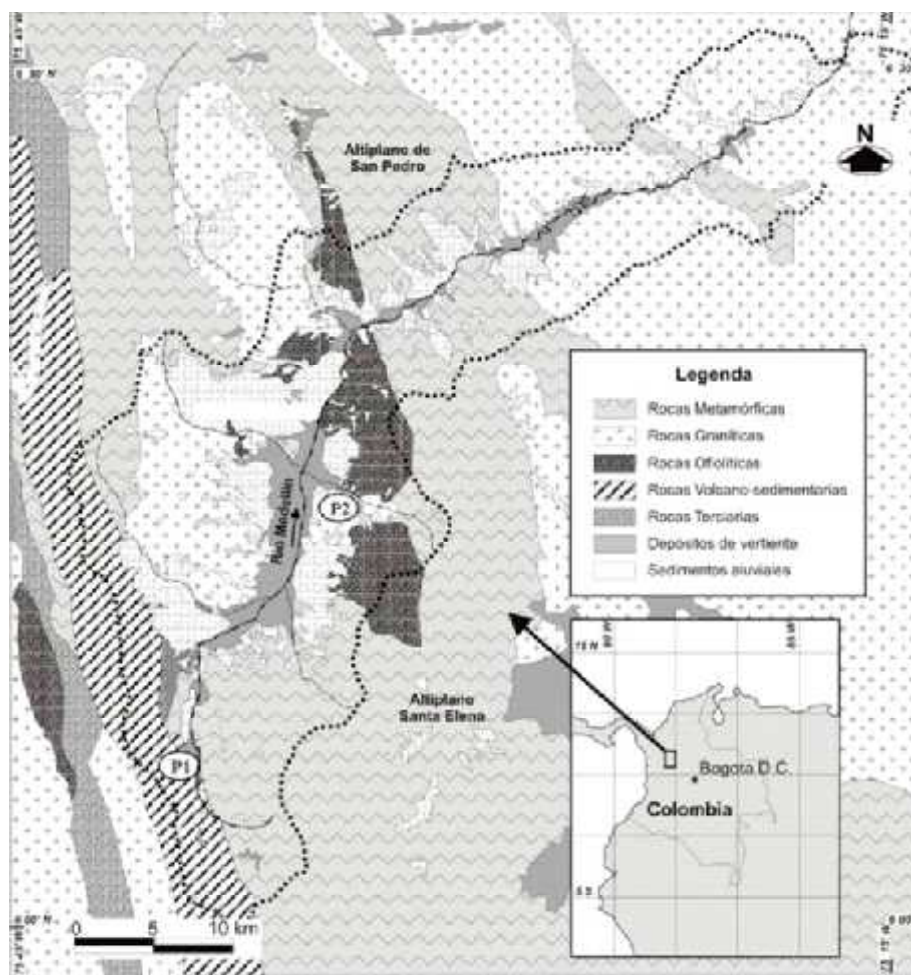


Figura 1. Localización y marco geológico de los perfiles de meteorización estudiados. Los círculos marcados con P1 y P2 representan la localización de los perfiles de meteorización.

El perfil de meteorización P1 se encuentra en rocas volcánicas del Complejo Quebradagrande, donde predominan localmente brechas volcánicas, y que regionalmente comprende metasedimentos como esquistos silíceos negros, filitas grafitosas, liditas, cuarcitas de grano fino y diques de andesita y dacita (ver Figura 2). Las rocas volcánicas del Complejo incluyen las rocas verdes debido a la cloritización de rocas basálticas. Este último tipo de roca se caracteriza por texturas félsicas y porfídicas, y por tener una mineralogía compuesta por plagioclasas muy alteradas y augita como mineral máfico predominante (AMVA, 2007). En los horizontes superficiales se encontró presencia de cenizas volcánicas transportadas, lo cual se refleja en los diferentes resultados de laboratorio que se obtuvieron para dicha muestra.

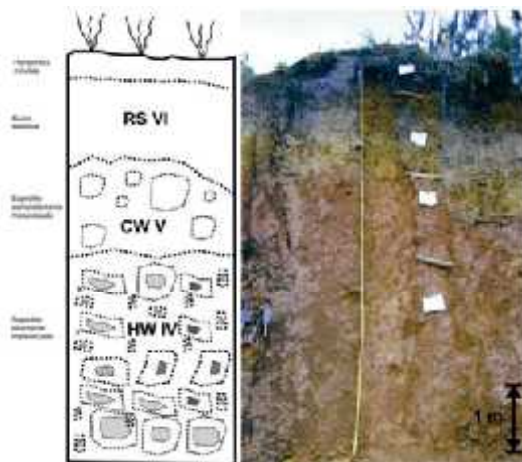


Figura 2. Perfil de meteorización en rocas volcánicas (P1)

El perfil de meteorización P2 se encuentra en rocas graníticas del Stock de San Diego, caracterizado como una unidad de cuerpos intrusivos cretáceos. Son rocas ígneas plutónicas básicas que varían composicionalmente, desde dioritas hasta gabros olivínicos. Presentan texturas desde fanerítica fina hasta pegmatítica (ver Figura 3). Mineralógicamente se observa feldespato cálcico y hornblenda, además de algún contenido ocasional de olivino. Como rasgo dominante esta unidad geológica exhibe un avanzado proceso de meteorización, favorecido por las condiciones climáticas y topográficas en las que se encuentra enmarcada (AMVA, 2007).

Ambos perfiles de meteorización presentan espesores de meteorización diferentes, lo cual refleja en gran medida la geología y tamaño de grano de la roca parental. Las rocas graníticas se caracterizan por profundos perfiles de meteorización asociados al tamaño de grano medio y grueso, en tanto que las rocas volcánicas, características por su tamaño de grano muy fino, presentan perfiles de menor espesor. Adicionalmente es probable que los procesos erosivos y evolución en el cuaternario de ambos sectores influyan en la diferencia de espesores, sin embargo se requieren mayores análisis al respecto que están fuera del alcance del presente estudio.

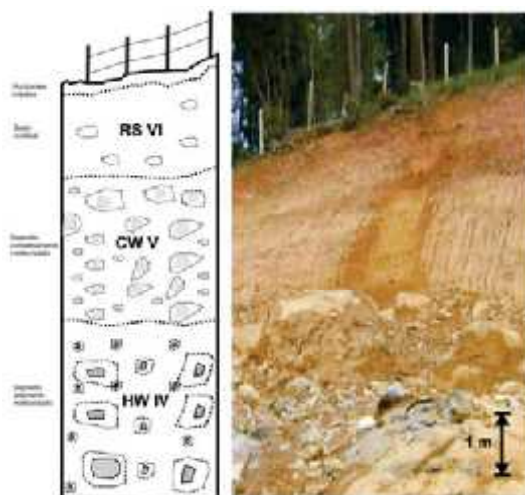


Figura 3. Perfil de meteorización en rocas plutónicas (P2)

3. RESULTADOS DE LABORATORIO

La totalidad de ensayos de laboratorio se realizaron en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia. La Tabla 1 presenta el resumen de los ensayos de humedad natural (norma ASTM D2216-05), límites de consistencia (norma ASTM D4318-05), determinación del peso específico de los sólidos (Gs) (norma ASTM D854-06) y clasificación USCS y así como la relación de vacíos determinados a partir de la Norma ASTM D2937-04 y de relaciones volumétricas. La Tabla 2 muestra los resultados de peso unitario en estado natural (húmedo) y seco.

Tabla 1. Resumen propiedades físicas

Muestra	Prof. (m)	W natural %	LP %	Casagrande Seca al aire		Gs	%Finos	Relación de vacíos (e)	Clasificación MCT	
				LL (%)	IP (%)					
P1-RS VI	1,1	105	-	-	-	2,53	87	1,98	MH	LA'
P1-CW V	1,7	44	52	72	20	2,83	96	1,50	MH	LA'
P1-HW IV	3	48	50	72	22	2,89	98	1,89	MH	LA'
P2-RS VI	2,5	38	49	56	7	2,83	95	1,01	MH	NS'
P2-CW V	12	38	47	54	7	2,87	92	1,72	MH	NS'
P2-HW IV	17,5	47	49	57	8	2,77	98	2,01	MH	NS'

Tabla 2. Resumen peso unitario húmedo y seco.

Muestra	Peso unitario húmedo (kN/m ³)	Peso unitario seco (kN/m ³)
P1-RS VI	13,4	8,5
P1-CW V	16,8	11,3
P1-HW IV	14,9	10,0
P2-RS VI	18,2	14,1
P2-CW V	15,0	10,6
P2-HW IV	17,7	9,2

3.1. Color

Una de las primeras características que permiten diferenciar los horizontes de un perfil de meteorización es el color, ya que puede ser un índice de cambio mineralógico o químico. Para el caso de estudio, en el perfil derivado de rocas volcánicas, el nivel de meteorización VI presenta tonalidad (Hue) 5YR con un color naranja correspondiente a un valor cromático 7/ 8. Los niveles V y IV presentan en general tonalidades 10R con un color rojo correspondiente a un valor cromático 5/ 8, moteado de amarillo anaranjado que clasifica en la tonalidad 7.5YR correspondiente a un valor cromático de 7/ 8.

En el perfil derivado de rocas plutónicas, los niveles de meteorización V y VI presentan tonalidad 2.5Y con color amarillo y valores cromáticos 7/ 8 y 8/ 8 respectivamente, moteado de naranja con tonalidad (Hue) 5YR y valor cromático de 6/ 8, en algunos casos en la base del nivel V aparece un color rojizo café correspondiente a una tonalidad 5YR con valores cromáticos de 5/ 8. El nivel IV presenta tonalidad 5YR con un color naranja correspondiente a un valor cromático de 6/ 8, moteado de un color gris con tonalidad 10Y que representa un valor cromático de 6/ 1.

En términos del color no se observan marcadas diferencias entre los perfiles de meteorización. En general se presentan tonalidades rojizas, amarillas y anaranjadas, las cuales varían entre horizontes.

3.2. Humedad natural

Se presentan en general valores mayores para el perfil 1 derivado de rocas volcánicas que para el perfil 2 derivado de rocas plutónicas. En general, no se observa una tendencia definida con la profundidad. Atípicamente la muestra P1 RS VI exhibe valores muy altos con un promedio de 105%, valor asociado a depósitos de ceniza volcánica.

3.3. Granulometría

Las curvas granulométricas (Norma ASTM D422-07) de ambos perfiles presentan un comportamiento similar predominando el tamaño fino, en general para la fracción fina ($< 0,075\text{mm}$), el tamaño del grano se hace menor con el aumento en el grado de meteorización, sin embargo para la roca volcánica el nivel más superficial (VI) presenta un tamaño de grano más grueso que el resto del perfil (manto de ceniza volcánica) (Figura 4 y 5).

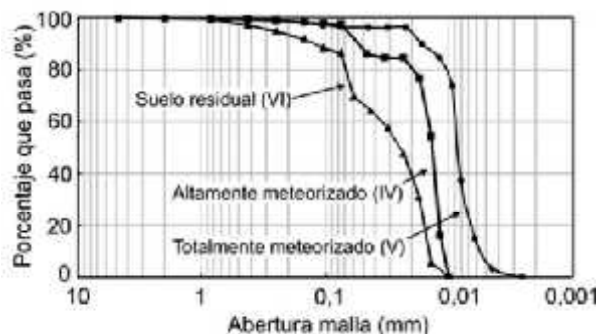


Figura 4. Curva granulométrica del perfil de meteorización en rocas volcánicas.

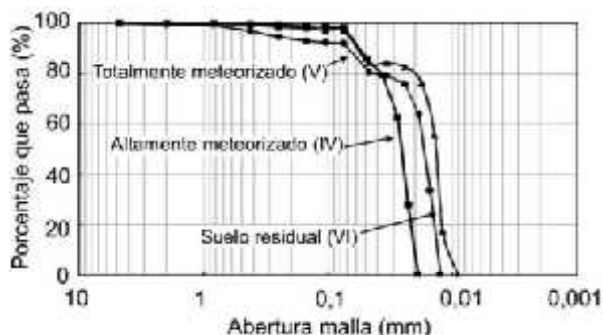


Figura 5. Curva granulométrica del perfil de meteorización en rocas plutónicas.

3.4. Porcentaje de finos

En general ambos perfiles presentan alto porcentaje de finos entre 92% y 98%. Solamente la muestra VI del perfil volcánico presenta un valor levemente inferior de 87% de finos consistente con los resultados discutidos en la granulometría de la misma muestra.

3.5. Límites de consistencia

Con relación a los límites de consistencia, no se presentan variaciones significativas en los valores reportados para cada perfil, hecho asociado a las pocas variaciones que se observan en las otras propiedades que se muestran en la Tabla 1. Sólo para el estrato P1-RS VI se observaron valores atípicos, probablemente asociado a la presencia de cenizas volcánicas en dicho horizonte.

Comparado los índices entre ambos perfiles se encuentran diferencias consistentes para todos los horizontes; los suelos derivados de la roca volcánica presentan límites líquidos, límites plásticos e índices de plasticidad mayores.

3.6. Clasificación rápida MCT (Miniatura, Compactado, Tropical)

La clasificación MCT propuesta por Nogami y Villibor en 1981 permite prever las propiedades mecánicas e hidráulicas de los suelos tropicales cuando son compactados para fines de obras viales. Esta clasificación agrupa los suelos

tropicales en dos grandes clases según el comportamiento: Lateríticos y No Lateríticos. Estas dos grandes clases se subdividen en grupos, designados por sus características granulométricas. Los grupos son: LG: arcillas lateríticas y arcillas lateríticas arenosas; LA'- arenas arcillosas lateríticas, LA- arenas con poca arcilla laterítica, NG'- arcillas, arcillas limosas y arcillas arenosas no lateríticas, NS'- limos caolínicos y micáceos, limos arenosos y limos arcillosos no-lateríticos, NA'- arenas limosas y arenas arcillosas no-lateríticas, NA- arenas limosas con limos cuarzosos y limos arcillosos no-lateríticos.

Para los dos perfiles en estudio, el perfil de origen volcánico clasificó como LA' (arenoso laterítico) y como NS' (no laterítico limo-arenoso) el perfil de origen plutónico. En condiciones naturales los suelos tipo LA', poseen baja masa específica aparente seca, baja capacidad de soporte y pueden ser colapsables por inmersión en agua. Los suelos del tipo NS' en sus condiciones naturales, presentan generalmente baja masa específica aparente seca, pueden ser colapsables y tener baja capacidad de soporte. En los taludes de corte, la erodabilidad varía de media a elevada (Nogami, 1995).

3.7. Compresión simple

La resistencia a la compresión no confinada (q_u) se define como el mínimo esfuerzo compresivo necesario para romper una muestra no confinada de suelo de forma cilíndrica, por lo que se toma la máxima carga alcanzada por unidad de área durante el ensayo (Norma ASTM D2166-06).

En general se observa que a mayor proporción de la fracción fina mayor resistencia en los suelos de estudio. Está resistencia puede estar también directamente relacionada con el índice de vacíos de las muestras; los resultados obtenidos evidencian que a menor índice de vacíos la resistencia es mas alta (Figura 6 y 7). Adicionalmente, considerando los resultados que se muestran en el numeral 3.8 de succión, se puede observar que en la humedad natural de cada estrato, el suelo que presenta succiones mayores genera resistencias mayores.

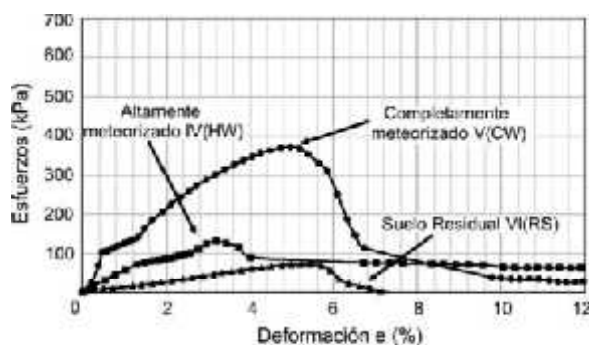


Figura 6. Resultados del ensayo de compresión simple para el perfil de meteorización de roca volcánica.

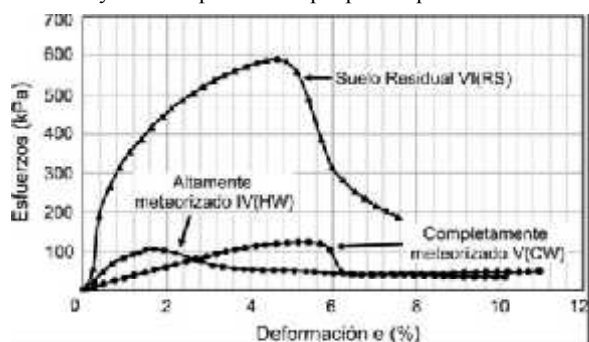


Figura 7. Resultados del ensayo de compresión simple para el perfil de meteorización de roca plutónica.

3.8. Succión

La succión se define como cantidad de trabajo que debe realizarse por cantidad unitaria de agua pura, a fin de transportar reversiblemente e isotérmicamente una cantidad infinitesimal de agua desde un depósito de agua pura a una elevación específica bajo presión atmosférica. El valor de succión total lo conforma la succión osmótica, función directa de la presencia de sales en el agua y sus propiedades termodinámicas, y la succión matricial, es función de las fuerzas capilares y de adsorción debidas a la matriz del suelo. Para la determinación de la succión matricial se utilizó el método del papel filtro (Norma ASTM D5298-92), generalmente considerado como un método confiable y funcional que ofrece un amplio rango de valores. Las curvas características de los dos perfiles presentan una forma bimodal que indica una distribución de poros no homogénea (Camapum & Leroueil, 2004) (Figura 8 y 9).

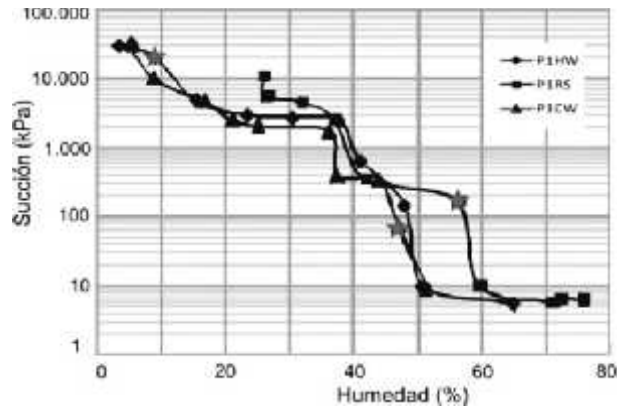


Figura 8. Curvas características Humedad vs succión del perfil de meteorización en rocas volcánicas. La estrella sobre cada curva corresponde a la humedad natural de la muestra.

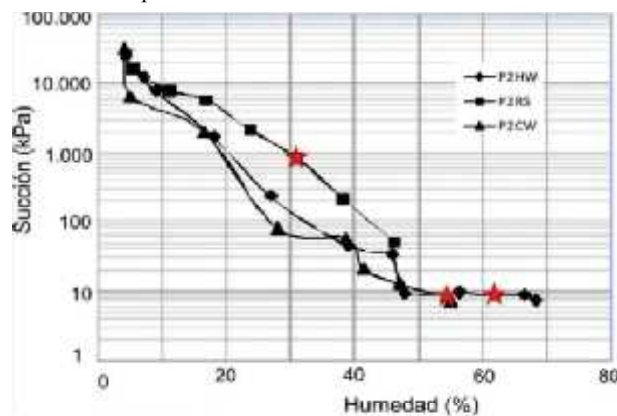


Figura 9. Curvas características Humedad vs succión del perfil de meteorización en rocas plutónicas. La estrella sobre cada curva corresponde a la humedad natural de la muestra.

3.9. Corte Directo

Para la finalidad de la investigación se realizó un ensayo de tipo consolidado rápido no drenado (CU) (Norma ASTM D3080-04), el cual permite simular la situación real en campo donde los estratos de suelo investigados serán sometidos a un cambio de esfuerzos rápido respecto al tiempo necesario para que se disipen las presiones de poros generadas, de manera que la probable ocurrencia de la falla del suelo se alcance en condiciones no drenadas. Se seleccionó este tipo de ensayo con el fin de caracterizar las propiedades mecánicas y comparar la resistencia de los materiales entre los niveles analizados y entre cada perfil.

Los ensayos fueron realizados con el objetivo de conocer los valores de cohesión [c], ángulo de fricción [φ] y la relación esfuerzo deformación en los horizontes de suelo correspondientes a los dos perfiles investigados. Para dicho objetivo

se realizó el ensayo por medio de la aplicación de tres cargas normales (10224, 20359 y 40629 g las cuales equivalen a las siguientes tensiones totales: 31.2, 62.1 y 123.9 kPa) sobre tres muestras para cada horizonte de suelo. Con los resultados obtenidos se grafica la relación $\sigma - \tau$ y aplicando el criterio de Mohr – Coulomb se encuentra la envolvente de falla, lo cual permite obtener los parámetros geotécnicos de cada estrato evaluado (Tabla 3).

Tabla 3. Ángulos de fricción y cohesiones. Para la muestra P1 CW V no se tienen valores de cohesión y ángulo de fricción.

MUESTRA	Angulo de Fricción (°)	Cohesión [kPa]
P1 RS VI	2	28
P1 HW IV	24	3
P2 RS VI	24	45
P2 CW V	18	5
P2 HW IV	18	13

En la Figura 10 se puede observar como ya fue mencionado, que la capa P1 RS VI presenta resultados diferentes a las otras capas del perfil de origen volcánico, las cuales presentan una tendencia bastante similar con relación a la resistencia al corte. Y se tiene al igual que en el caso de la resistencia a la compresión simple, que la resistencia al corte puede estar asociada a la proporción de la fracción fina, al índice de vacíos de las muestras y a la succión de la muestra en la humedad natural.

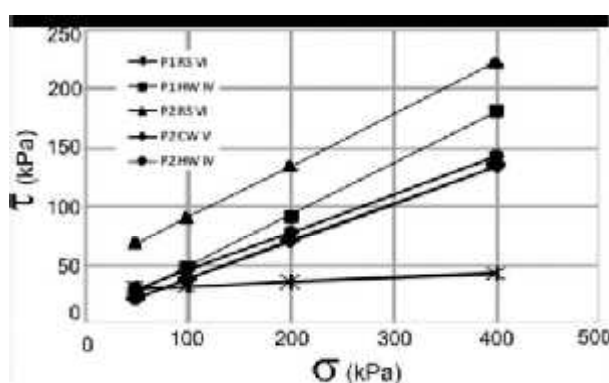


Figura 10. Relación entre el esfuerzo normal aplicado y la resistencia al cortante.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Las Figuras 11, 12, 13, 14 y 15 presentan las diferentes relaciones de los perfiles de meteorización entre el porcentaje de finos, peso específico, resistencia a la compresión simple, resistencia al corte, índice de vacíos y succión para la totalidad de los horizontes muestreados y analizados.

Relacionando las diferentes propiedades para los dos perfiles, existe una correlación alta inversamente proporcional entre el índice de vacíos, la resistencia a la compresión simple y la succión; así como se tiene una relación entre la succión y la resistencia de los perfiles, lo cual refleja la importancia que la estructura y la succión tienen en el comportamiento mecánico de estos materiales.

En la figura 15 se observa un incremento en la resistencia al corte al aumentar la succión, en general observado por diferentes autores (Escario & Sáez, 1986). Sin embargo los resultados obtenidos son consistentes en presentar que para bajos valores de succión, cuando se incrementa la succión existe una reducción a la resistencia de los suelos. Se requieren más ensayos de laboratorios que permitan verificar dichos resultados y explicar este comportamiento.

Cuando es relacionada la gravedad específica de los sólidos con el porcentaje de finos, en el caso de las rocas ígneas volcánicas, cuando aumentan los minerales presentes en la fracción fina, aumentan la gravedad específica del material;

al contrario de las rocas plutónicas donde los minerales presentes en la fracción fina, cuando aumentan, disminuyen la gravedad específica del material. Un estudio de la mineralogía de los perfiles a partir de ensayos como el de difracción de rayos-X permitiría confirmar este aspecto.

Debe tenerse en cuenta, que si bien en este estudio las variables analizadas de la Figura 11 a la Figura 15 presentaron una relación lineal o polinómica, este comportamiento no debe ser generalizado para otros suelos. Adicionalmente es necesario realizar análisis de significancia estadística estimando los intervalos de confianza de la regresión debido a que el número de datos es muy bajo, análisis que daría mayor solidez a los resultados.

Finalmente es importante considerar las limitaciones que siempre existirán en el número de ensayos realizados, situación que puede generar localmente datos erróneos o poco representativos que finalmente afectan los resultados obtenidos y las interpretaciones de ellos.

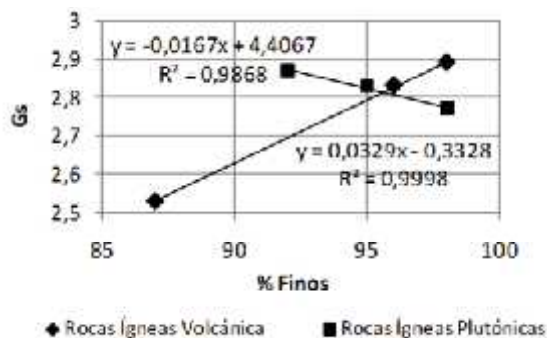


Figura 11. Relación % Finos y Peso específico de los sólidos (Gs)

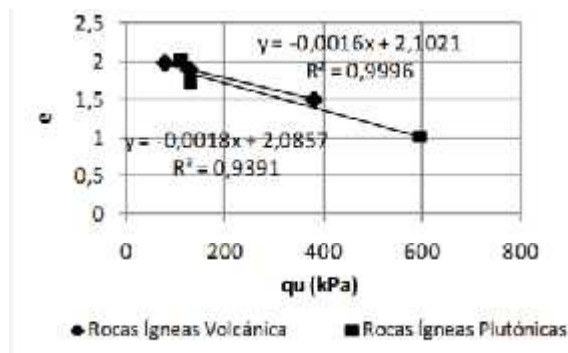


Figura 12. Relación entre la resistencia a la compresión simple (qu) y el índice de vacíos (e)

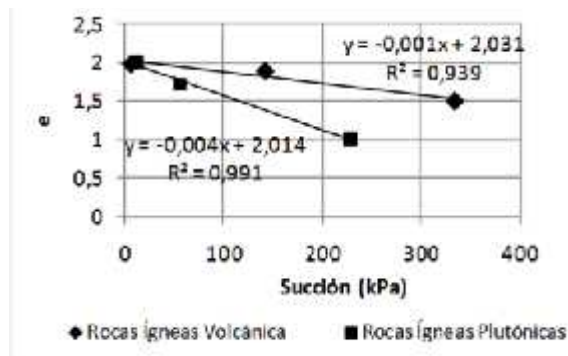


Figura 13. Relación entre la succión y el índice de vacíos

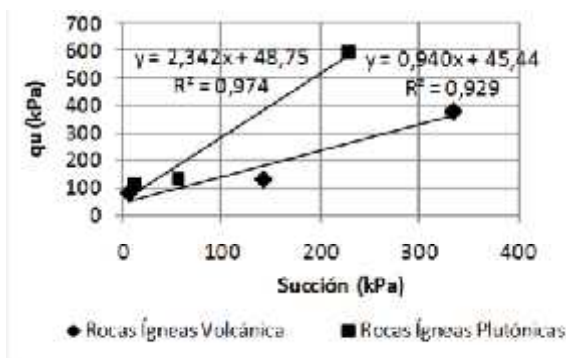


Figura 14. Relación entre la succión y la resistencia a la compresión simple (qu)

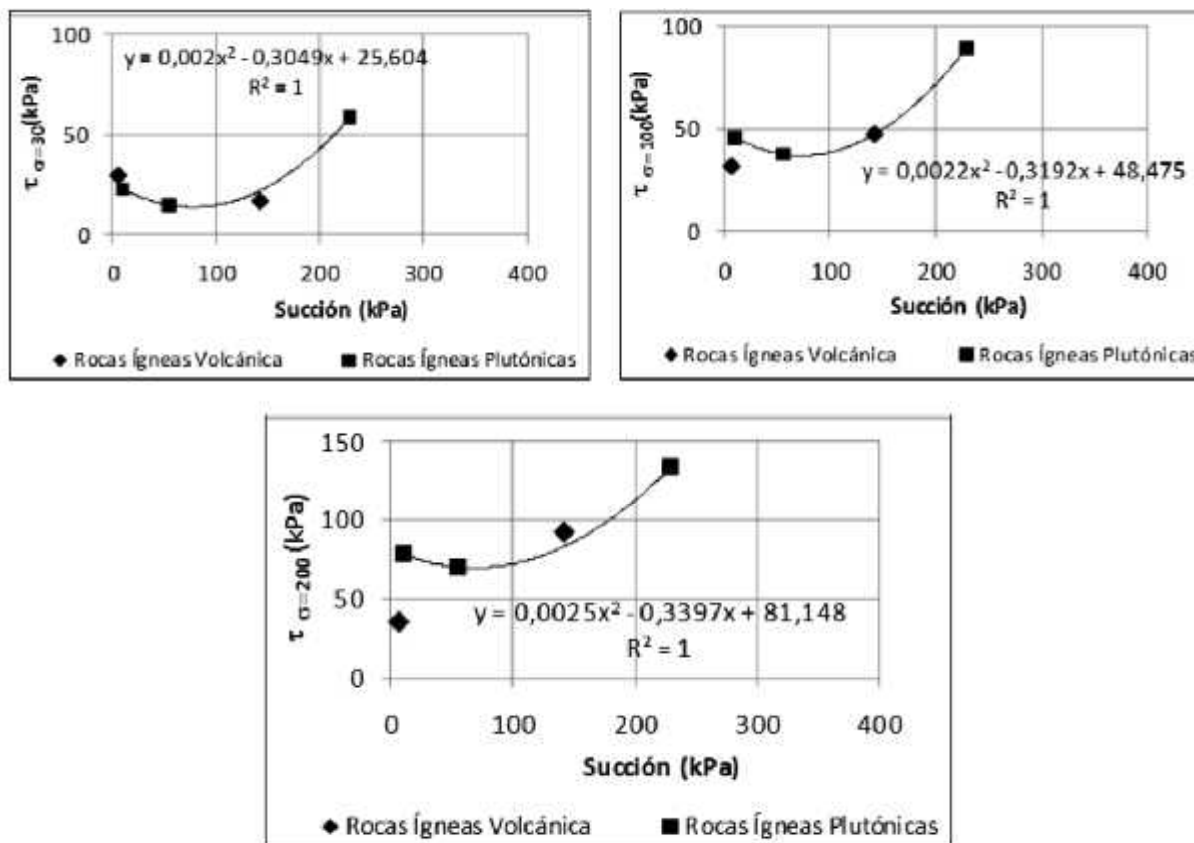


Figura 15. Relación entre la succión y la resistencia al corte (τ) para esfuerzo vertical de 30, 100 y 200 kPa

AGRADECIMIENTOS:

Al profesor Hernán Eduardo Martínez Carvajal por su ayuda en la revisión del presente artículo y al Laboratorio de Suelos de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, donde se realizaron los ensayos en los suelos.

BIBLIOGRAFÍA

Anon, 1981. Rock and soil description and classification for engineering geological mapping. Bulletin of International Association of Engineering Geology. 24, pag. 253-274.

- Anon, 1988. Geoguide 3, Guide to soils and rock descriptions. Geotechnical Control Office, Hong Kong Government printer.
- Anon. 1990. Tropical Residual soils. Geological Society Working Party Report. Quarterly Journal of Engineering Geology, 23, 1-102.
- Anon 1995. The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. Geological Society Working Party Report. Quarterly Journal of Engineering Geology, 28, 207-242.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. 2007- Microzonificación y evaluación del riesgo sísmico en el valle de Aburrá. Grupo Sísmico de Medellín. Informe Interno. Medellín.
- ASTM Committee D-18. 1993. D248-93 Standard practice for description and identification of soils (visual-manual procedure) en Soil and rock.
- ASTM D2216 - 05 Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass.
- ASTM D2937 -04 Standard test methods for density of soil in place by the drive-cylinder method.
- ASTM D854 - 06 Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer.
- ASTM D4318 - 05 Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils.
- ASTM D2166-06 - Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil.
- ASTM D3080-04 Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions.
- ASTM D5298 - 03 Standard test methods for measurement of soil potential (Suction) using filter paper.
- Blight, G.E. 1997. Mechanics of residual soils. Balkema Rotterdam eds. 237 pag.
- Caballero, H., 1998. Notas de clase. Curso Geomorfología. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Camapum de Carvalho, J. ; Leroueil, S. (2004). Curva característica de sucção transformada. Solos e Rochas, São Paulo, v. 27, n. 3, p. 231-242.
- Deere, D.U., Patton F.D. 1971. Slope stability in residual soils. En Proc., Fourth Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Puerto Rico. Vol. 1, Pág. 87-170.
- Escario , V., Saez, J. 1986. The shear strength of partly saturated sols. Geotechnique, 36. Pag. 453-456.
- Fookes, P. G. Tropical residual soils. Geological Society Engineering Group, Working Party Revised report. 184 pag. London.
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H. 1993. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. Eds. John Wiley & Sons, INC. 517 pág.
- Geological Society of America. Rock Color Chart.
- Geotechnical Engineering Office -GEO- 1988. Geoguide 3: Guide to rock and soil descriptions. 186 pág.
- Little, A.L. 1969. The engineering classification of residual tropical soils. Proceedings of 7th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1, pag. 1-10.
- Moye, D.G. 1955. Engineering geology for the Snowy Mountain scheme. Journal of Institution of Engineers, Australia, 27. Pág. 287-298.
- Munsell. Color Chart.
- Nogami, J. S. & Villibor, D. F. (1981). Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, ABMS, pp. 30-41.
- Nogami, J. S. & Villibor, D. F. (1995). Pavimentação de baixo custo com Solos Lateríticos. São Paulo: Ed. Vilibor, São Paulo, SP, 213 pp.

- Ollier, C.D. 1984. *Weathering*: Longman.
- Ruxton, B.P., Berry, L. 1957. Weathering of granite and associated erosional features in Hong Kong. *Bulletin of Geological Society of America* 68. Pag. 1263-1292.
- Shaw, J.N., West, L.T. 2006. Sesquioxides. *Encyclopedia of Soil Science*. Ed. Rattan Lal. USA.
- Shellmann, W. 1981. Consideration on the definition and classification of laterites. *Proceedings on the International Seminar on Lateritisation Processes*, Trivandrum, India. A.A. Balkema, Rotterdam, pág. 1-10.
- The Geological Society of London, 1997. *Tropical Residual Soils*. Capitulo 4. Pag. 59 – 83.
- Universidad Nacional de Colombia, 2007. *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá, aspectos principales*. AMVA, Corantioquia, CORNARE. 238 pág.
- Voicu, G. Bardoux, M. 2002. Geochemical behavior under tropical weathering of the Barama–Mazaruni greenstone belt at Omai gold mine, Guiana Shield. *Applied Geochemistry* 17, 321–336.
- Wesley, L.D., Irfan, T.Y. 1997. Classification of residual soils. In *Mechanics of residual soils*. Eds G.E. Blight. Netherdelands. Pág. 237.