

Geotechnical variations on a tropical soil produced by municipal solid waste leachate

Alejandro Quintero-Ramírez^a, Yamile Valencia-González^a & Luis Augusto Lara-Valencia^a

^a Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, Colombia. alejandroquinteror@gmail.com, yvalenc0@unal.edu.co, lualarava@unal.edu.co

Received: June 07th, 2016. Received in revised form: November 1st, 2015. Accepted: December 7th, 2016.

Abstract

Solid waste disposal has become a problem for municipal administrations due to the population growth and the limited availability of land for such uses, furthermore, the increase of rainfall for long periods produces a large amount of leachate that requires a proper disposal. This study was carried out to analyze the effect of municipal solid waste leachate in soils, in this way, different tests of physical, chemical, mechanical and mineralogical properties were performed on two samples of a residual soil from the Batolito Antioqueño, located in Rionegro city. For the first sample, geotechnical characterization tests were executed in the natural soil condition. On the other hand, the same tests were implemented in the second sample after go through a leachate process. Were found important variations in the properties of the soil affected by the process of contamination when compared with the properties of the natural soil condition.

Keywords: Leachate, solid waste, tropical soils.

Variaciones geotécnicas en un suelo tropical causadas por los lixiviados de residuos sólidos urbanos: Escala laboratorial

Resumen

Debido al alto índice de crecimiento de población que enfrentan las grandes ciudades, la disposición de residuos sólidos se ha convertido en un problema para las administraciones debido a la baja disponibilidad de tierra para tales usos; sumado a ello, el incremento de las lluvias por largos periodos genera una gran cantidad de lixiviados que requieren de una adecuada disposición. Para estudiar el efecto que pueden generar estos lixiviados de los residuos sólidos en los suelos, a escala de laboratorio se han realizado diferentes ensayos de caracterización física, química, mineralógica y mecánica sobre dos muestras de un suelo residual del Batolito antioqueño, ubicadas en el municipio de Rionegro-Antioquia. A la primera muestra se le efectuaron ensayos de caracterización geotécnica en estado natural y a la segunda muestra se le efectuaron los mismos ensayos pero después de someterla a un proceso de lixiviación. La metodología consistió en colocar la muestra de suelo inalterado dentro de un recipiente al cual se agregó una tercera parte del tamaño de la muestra de suelo, en cantidad de residuos biodegradables durante un mes. Este proceso de lixiviación mostró importantes variaciones en las propiedades físicas, químicas y mecánicas al compararla con la muestra en estado natural, producto del proceso de contaminación al que fue sometido el suelo.

Palabras claves: Lixiviados, residuos sólidos, suelos tropicales.

1. Introducción

El estudio de los suelos tropicales en Colombia ha sido poco abordado en el campo de la ingeniería, debido principalmente a la gran variabilidad y complejidad en las propiedades que presentan los suelos de estas regiones. Esto se evidencia en gran parte de las obras de ingeniería, en las cuales se implementan modelos de la mecánica clásica de

suelos, lo cual ha propiciado la falla de grandes proyectos a lo largo de todo el territorio Colombiano. Por tal motivo, en esta investigación se aborda un caso particular de estudio en un suelo tropical perteneciente a la unidad geológica del Batolito Antioqueño, ubicado en el municipio de Rionegro-Antioquia. Específicamente, se simuló a escala de laboratorio para un mayor control de los procesos, la contaminación de un suelo, con el fin de analizar las alteraciones físicas,

How to cite: Quintero-Ramírez, A., Valencia-González, Y. & Lara-Valencia, L.A., Variaciones geotécnicas en un suelo tropical causadas por los lixiviados de residuos sólidos urbanos: Escala laboratorial. Boletín de Ciencias de la Tierra, (41), 40-47, 2017.

químicas, mineralógicas y mecánicas de los suelos tropicales de la región cuando están en contacto con los lixiviados provenientes de desechos orgánicos; implementando diferentes ensayos de laboratorio a muestras de suelo en estado natural y contaminada que permitan realizar una comparación entre los resultados obtenidos.

Se espera que esta investigación contribuya al entendimiento de las alteraciones que se generan en un suelo contaminado, al manejo que se le debe dar a los residuos orgánicos y a su disposición, a los cuidados que hay que tener con los lugares que en un futuro sean destinados para la disposición de estos residuos, y al desarrollo de métodos de prevención de riesgos que puedan ser causados por los malos manejos que se le da hoy en día a los residuos sólidos.

2. Marco teórico

2.1. Residuos y contaminación

Entre los diferentes tipos de contaminantes que existen se encuentran los residuos orgánicos, los cuales están compuestos en su mayoría por materiales que pueden afectar las propiedades geotécnicas de los lugares donde son depositados.

Los residuos sólidos pueden ser clasificados según su peligrosidad en tres diferentes clases; peligrosos, inertes y no inertes, esta clasificación depende en su mayoría de la composición química de los materiales de desecho [1], dicha composición se describe para la clase I que son los peligrosos, como aquellos que presentan riesgo a la salud pública o al medio ambiente y se caracterizan por tener propiedades inflamables, corrosivas, reactivas, tóxicas y/o patogénica. La clase II que corresponde a los no inertes, pueden tener propiedades inflamables, biodegradables o solubles; pero no clasifican como residuos Clase I o Clase III. Los residuos clase III, no tiene constituyente alguno solubilizado en concentración superior al patrón de potabilidad de aguas.

Dentro de los residuos sólidos se pueden ubicar los residuos domésticos y urbanos [2]. Los principales contaminantes de éstos residuos provienen de la descomposición de la materia orgánica presente (alrededor del 60% en peso), generando lixiviados (líquido oscuro, ácido y de alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO)). La DBO de las aguas residuales domésticas es del orden de 200 mg/l. Solo estas características le dan a los líquidos contaminantes su considerable poder agresivo con el medio ambiente.

2.2. Procesos de migración de los contaminantes en los medios geológicos

Según [2], los procesos de migración de los contaminantes dependen en su mayoría de las condiciones en las que se encuentre el lugar de disposición, ya que los contaminantes pueden viajar a través de medios porosos, medios fracturados, saturados y no saturados. Los contaminantes depositados en la superficie, atraviesan los diferentes horizontes del suelo no saturado y la zona no capilar, alcanzando la zona saturada. En la zona no saturada,

cuyos poros están llenos de agua y aire, el flujo de agua es dependiente de la fuerza de gravedad y de la forma de los poros, siendo vertidas hacia abajo. En la zona saturada, los poros están llenos de agua, el flujo es dependiente del gradiente hidráulico y los contaminantes pueden expandirse por grandes áreas y cubrir largas distancias.

Los principales procesos físicos, químicos y biológicos que controlan la migración de contaminantes son:

- Flujo subterráneo: Proceso físico en el cual las aguas subterráneas fluyen a través de los poros y las fracturas en suelos y rocas, transportando contaminantes disueltos o en solución.
- Dispersión hidrodinámica: En este proceso físico las aguas subterráneas fluyen más rápidamente en algunos poros y fracturas, produciendo esto el mezclado de aguas contaminadas con aguas no contaminadas, lo que aumenta el área afectada por los contaminantes.
- Separación gravimétrica: Es un proceso físico en el que los líquidos menos densos que el agua como la gasolina, tienden a flotar en las partes altas de los acuíferos, mientras los más densos se ubican en las partes bajas, lo que puede generar zonas de concentración en los acuíferos dependiendo de la densidad del contaminante.
- Filtración: Proceso físico donde se pueden filtrar aguas subterráneas con partículas en suspensión en el suelo y las rocas, lo que reduce la concentración de los contaminantes presentes.
- Adsorción e intercambio iónico: Éste es un proceso químico donde algunos contaminantes disueltos tienden a adherirse a las superficies de los minerales, reduciendo la concentración y la velocidad de migración.
- Reacción óxido-reducción: Proceso químico en el cual se dan alteraciones de la estructura molecular y propiedades iónicas de los contaminantes, pudiendo alterar la toxicidad, el comportamiento químico y la movilidad de los contaminantes.
- Hidrólisis: Proceso químico de reacción con el agua, lo cual altera la naturaleza iónica y molecular de los contaminantes, reduciendo su concentración.

Con relación a los procesos biológicos, se tiene la transformación microbioquímica, donde las bacterias y otros microorganismos alteran o descomponen los contaminantes orgánicos y algunos inorgánicos a través de reacciones enzimáticas y de respiración, lo que puede crear nuevos productos tóxicos.

3. Área de estudio

La zona de estudio se ubica en el Municipio de Rionegro, el cual está sobre la cordillera central, en el centro- oriente del departamento de Antioquia, específicamente a 45 kilómetros de Medellín. Hace parte de la subregión del Altiplano de Oriente que está integrada por los Municipios de El Retiro, La Ceja, La Unión, El Carmen de Viboral, El Santuario, Marinilla, Guarne, San Vicente y Concepción. Sus altitudes varían entre los 2100 y los 2600 m.s.n.m. El relieve presenta pequeñas colinas de cimas redondeadas y algunos cerros de mayor altura

y pendiente. En el occidente se presenta un sistema montañoso más pronunciado, que es una barrera física entre el Valle de Aburrá y el Altiplano de Rionegro, de donde nacen los principales afluentes del Río Negro. La precipitación promedio anual varía entre 1800 y 2500 milímetros, una temperatura media de 17°C y una humedad promedio del 90%. La zona de estudio está ubicada al norte del municipio de Rionegro, a los 6° 13' 54,47" latitud Norte y 75° 22' 56,12" de la latitud Oeste, a 2,5 km desde la entrada al municipio de San Vicente por la autopista Medellín-Bogotá. Sus suelos son originados de rocas ígneas intrusivas de carácter ácido, las cuales corresponde al batolito antioqueño, compuesto por granito (roca ígnea intrusiva plutónica de carácter ácido con abundante presencia de cuarzo acompañado de feldespato, micas, hornblenda y augita) [3].

4. Metodología

El perfil utilizado para la extracción de las muestras trabajadas revela un perfil de meteorización de suelo residual del Batolito antioqueño. El talud expone claramente cuatro estratos de meteorización. En los primeros 0,10 m se tiene una capa vegetal, por los siguientes 0,30 m aparece la capa orgánica, compuesta por la descomposición de las raíces de la capa vegetal, los siguientes 0,40 m corresponden a una capa de ceniza volcánica, y los últimos 1,50 m al suelo residual (Fig. 1). De este último horizonte, se extrajeron las muestras para la presente investigación. Fueron recolectadas varias muestras alteradas e inalteradas del suelo con el fin de caracterizarlo química, física, mineralógica y mecánicamente, tanto en estado natural como contaminado y poder analizar las variaciones ocurridas por el proceso de contaminación. Se recuperaron dos muestras inalteradas en recipientes cilíndricos de aproximadamente 0,28 m de diámetro y 0,38 m de altura, una para efectuar la caracterización del sitio en estado natural, y la otra muestra para someterla a un proceso de lixiviación de fluidos, originados a partir de residuos sólidos enmarcados entre la clasificación de desechos domésticos y urbanos.

4.1. Proceso de lixiviación

Este proceso se realizó para simular la contaminación del suelo en un relleno sanitario sin control (basurero), en el cual el suelo está en contacto con los residuos sólidos y sometido en el tiempo a un proceso de lixiviación producto de las aguas lluvias y los líquidos propios de la basura, los cuales son transportados a través de los residuos hasta llegar al suelo, generando así una contaminación en los estratos superiores de éste.

Inicialmente a la muestra inalterada se le modificó la altura para que quedara un espacio libre de 0,14 m. en donde se pudieran depositar los residuos orgánicos que harán las veces de contaminante de la muestra, los cuales se dejaron durante un mes para garantizar la lixiviación de los mismos. Transcurrido este tiempo, se procedió a realizar los ensayos de caracterización geotécnica del material y efectuar la respectiva comparación con la muestra natural.

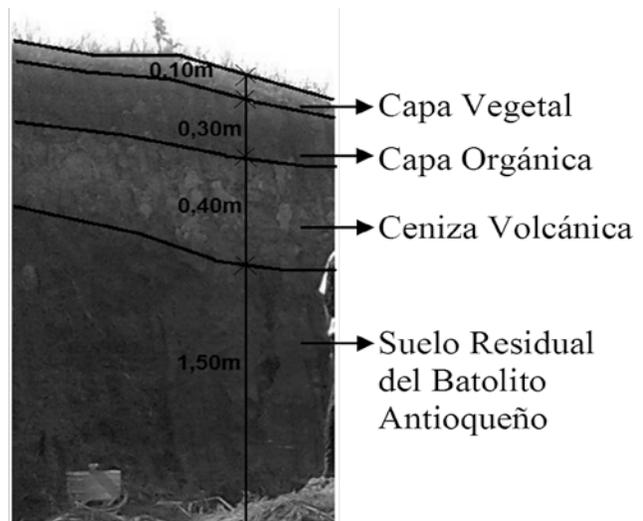


Figura 1. Perfil de meteorización del sitio de estudio
Fuente: Los autores.

La etapa de laboratorio consistió en la caracterización geotécnica de las muestras recuperadas en el sitio descrito. Se realizaron igual cantidad y tipo de ensayos a la muestra sin ningún tipo de exposición a contaminantes y a la muestra previamente contaminada garantizando la repetitividad de los mismos. La muestra que representa la condición “in situ” de la zona, es decir, la muestra sin ningún tipo de contaminantes, será llamada como “muestra natural”. Y a la muestra que se sometió al proceso de lixiviación se le dará el nombre de “muestra contaminada”.

Cabe aclarar que los ensayos de caracterización sobre la muestra contaminada, se realizaron bajo las mismas condiciones de humedad encontradas en la muestra natural, con el fin de eliminar la variable de humedad dentro de las comparaciones.

4.2. Ensayos de caracterización

Los ensayos de caracterización geotécnica realizados sobre las dos muestras se dividieron en 4 grupos; caracterización física, caracterización mineralógica y estructural, caracterización química y caracterización mecánica.

4.2.1. Caracterización física

La caracterización física consiste en obtener los índices físicos de los materiales, clasificación de suelos y otras propiedades de interés. Entre ellos se tiene: Contenido de humedad natural [4], Gravedad específica [5], Análisis granulométrico de suelos (con y sin agente defloculante) [6], Límites de consistencia (seco al aire y con humedad natural) [7] y clasificación de muestras según ensayo MCT rápido [8].

4.2.2. Caracterización mineralógica y estructural

Para determinar los minerales existentes en las muestras, el suelo se somete al ensayo de Difracción de rayos X. La estructura de los materiales se visualiza a través del

Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), que permite adicionalmente la identificación cualitativa y cuantitativa de los elementos químicos en los minerales.

4.2.3. Caracterización química

Esta caracterización se realizó con el fin de determinar la variación en las propiedades químicas de las muestras, inducidas por el proceso de contaminación al que fueron sometidas. Dentro de esta caracterización se determinó: pH en H₂O y en KCL, Capacidad de intercambio catiónico (CIC) y Porcentaje de materia orgánica.

4.2.4. Caracterización mecánica

Los ensayos para la caracterización mecánica consistieron en: Ensayos de corte directo tipo CD (natural y saturado) [9], Ensayos de compresión simple en humedad natural [10], Ensayos duplo-edométricos [11], Determinación de la curva característica de retención de agua (Succión) [12] y Ensayo de desagregación (metodología descrita en [13]).

5. Resultados y Análisis

5.1. Caracterización física

En la Tabla 1 se presentan algunos parámetros físicos obtenidos para las dos muestras. Como se verá en los resultados de la difracción de rayos x, al no ocurrir una variación en la mineralogía del suelo al pasar del estado natural al estado contaminado, la gravedad específica de los sólidos no cambia, por ser ésta una propiedad cuyo valor está influenciado por la mineralogía del material. Con relación al índice de vacíos se puede observar que aumenta cuando se contamina el suelo, este cambio puede afectar el comportamiento mecánico e hidráulico del material, por contar con un suelo más poroso. La poca variación que se dio en los límites de plasticidad tanto para la muestra natural como contaminada, hace que la clasificación de estos materiales sea la misma, lo cual se presenta porque no hay cambios mineralógicos de un estado a otro.

Tabla 1. Índices físicos de las muestras natural y contaminada.

Parámetro físico	Muestra natural	Muestra contaminada
Gravedad específica (Gs)	2,79	2,79
Relación de Vacíos (e)	1,54	1,69
Peso unitario [kN/m ³]	14,43	13,55
Peso unitario seco [kN/m ³]	11,02	10,42
Humedad Natural [%]	30,89	30,06
Porosidad (n) [%]	60,63	62,78
Grado de saturación (Sr) [%]	56,26	50,16
Límite Líquido seco al aire [%]	54	54
Límite Plástico seco al aire [%]	42	44
Índice de Plasticidad seco al aire [%]	12	10

Fuente: Los autores

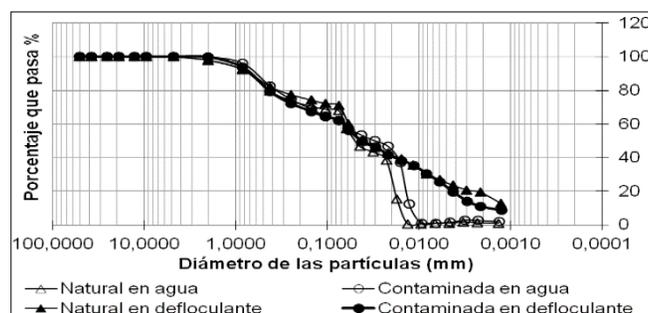


Figura 2. Curvas granulométricas en agua y en agente defloculante de las muestras natural y contaminada.

Fuente: Los autores.

Los ensayos de MCT realizados en los suelos, clasifican tanto la muestra natural como contaminada como No Lateríticas; la muestra natural se ubica en el grupo NS'/NA', donde el símbolo (/) indica que tiene mayor peso la primera clasificación (NS'), y la muestra contaminada se ubica en el grupo NG'. Estos grupos de clasificación se caracterizan por ser suelos de comportamiento no laterítico, suelos que presentan intemperización, pero no muy profunda, lo cual puede deberse a que los procesos erosivos locales juegan un papel importante, que no permite el desarrollo de perfiles maduros [14].

El cambio que provoca pasar de NS' (limo arenoso) a NG' (limo arcilloso) ocurre básicamente por un aumento en la contracción del material contaminado. Dicha contracción posiblemente se potencio porque al contaminar el suelo se incrementan los iones existentes en él; esto genera una mayor atracción entre las partículas de arcilla, ocasionando un aumento en la agregación. El incremento en la contracción es un aspecto que debe tratarse con cuidado en la geotecnia porque la contracción puede generar grietas en el suelo que desencadenen en posteriores problemas de estabilidad.

El análisis granulométrico se efectuó combinado; cada muestra se evaluó primero con agua y luego con agente defloculante (hexametáfosfato de sodio), esto para evaluar si existe agregación en los granos, y comparar que efecto produce la contaminación en las muestras.

Analizando separadamente las muestras en estado natural y contaminado (Fig. 2), se puede observar diferencias en la franja de los finos (<0,074mm) cuando se usa defloculante, lo cual refleja la existencia de agregaciones, que son inestables en presencia de aguas residuales, ya que neutralizan las cargas en los minerales [14]. Ya observando las curvas en estado natural y contaminado, entre sí, se puede ver que la muestra contaminada presenta levemente partículas de menor tamaño que la muestra natural, tal como lo indicó la clasificación MCT.

5.2. Caracterización mineralógica y estructural

5.2.1. Difracción de Rayos X

Comparando el difractograma resultado del ensayo de rayos X para la muestra contaminada y la muestra natural (Fig. 3), se puede observar que la cantidad relativa para cada mineral identificado, disminuye en el material contaminado

comparado con el material natural. Como no hay cambio mineralógico, sino cambio de la intensidad relativa de los picos, se considera que pudo generarse un lavado de minerales debido a los lixiviados, producto de la descomposición de los sólidos orgánicos o simplemente deberse al proceso de muestreo. Con relación a los minerales existentes en las muestras (P1: Caolinita, P2: Moscovita, P3: Cuarzo, P4: Moscovita, P5: Cuarzo), la presencia de caolinita en el suelo se explica como el producto de la meteorización de las plagioclasas y debido a que el pico de ésta, es relativamente bajo, se puede pensar en un suelo joven como se vio en la clasificación MCT donde el suelo clasificó como No Laterítico.

5.2.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

En las Figs. 4a y 4b se observan las diferencias estructurales y mineralógicas entre la muestra natural y la contaminada, observadas en el Microscopio Electrónico de Barrido:

5.3. Caracterización química

En la Tabla 2, se muestran los resultados obtenidos de los análisis químicos realizados a la muestra natural y a la contaminada, en estos resultados se pueden ver datos representativos como el potencial de hidrogeniones (pH), el contenido de materia orgánica (M.O.) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC):

Para la muestra natural se obtuvo un $pH_{H_2O} = 5,30$, lo que corresponde a un suelo ácido, en la muestra contaminada se tiene una disminución del pH de 5,30 a 4,60, lo que representa un aumento de H^+ libres; éste incremento en la acidez se da principalmente por el aumento de materia orgánica. El ΔpH ($pH_{KCl} - pH_{H_2O}$) negativo indica que hay predominancia de arcillo minerales en las dos muestras, concordando con la clasificación de No-Laterítico. Como era de esperarse, hubo un aumento en el porcentaje de materia orgánica en la muestra contaminada, debido a la descomposición de los residuos orgánicos usados para la lixiviación sobre la muestra, por tal motivo se genera también un incremento en la CIC. Un aumento en la CIC genera un suelo con mayor capacidad para retener y liberar iones positivos (Suelo más inestable químicamente).

5.4. Caracterización mecánica

En el comportamiento mecánico del suelo se generaron algunos cambios significativos debido al proceso de contaminación al que se sometió la muestra, además se identifican algunas variaciones de comportamiento entre las muestras saturadas y no saturadas.

5.4.1 Corte directo

En la Tabla 3 se muestran algunos de los resultados más importantes obtenidos de todos los ensayos de corte directo realizados a las muestras natural y contaminada:

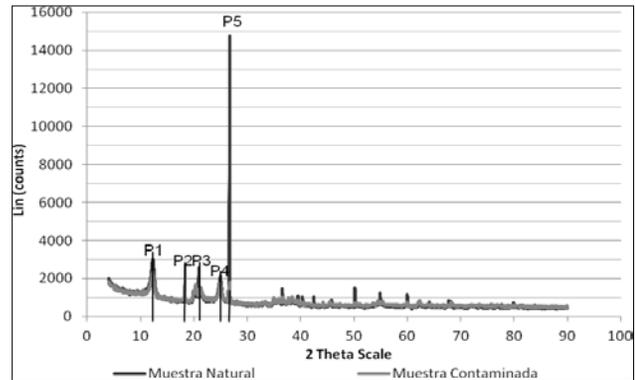
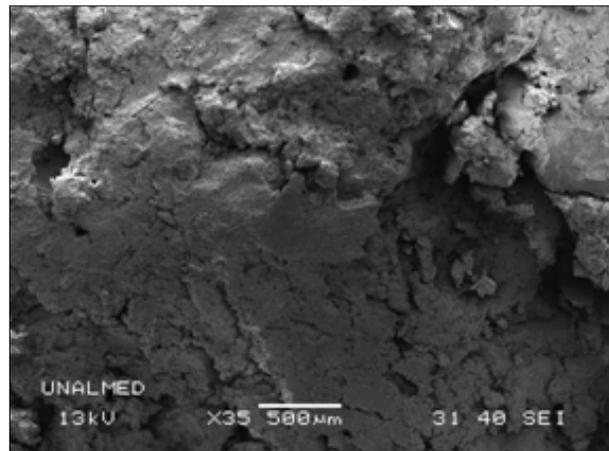
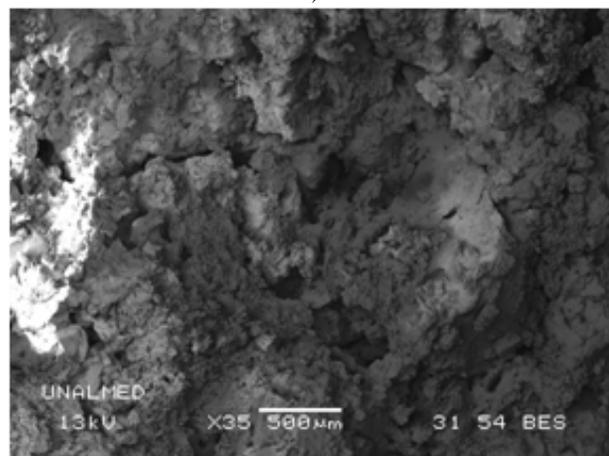


Figura 3. Difractogramas de las muestras natural y contaminada.

Fuente: Los autores.



a)



b)

Figura 4. Imágenes comparativas de los (SEM). a) Suelo natural, b) Suelo contaminado.

Fuente: Los autores.

Tabla 2. Composición Química de las muestras analizadas

Muestra	pH H_2O	pH KCL	Δ pH	CIC pH7
Natural	5,3	3,9	-1,4	7,83
Contaminada	4,6	3,9	-0,7	10,05

Fuente: Los autores

Tabla 3.

Parámetros de resistencia de las muestras estudiadas.

Parámetro	Natural sin saturar	Natural saturada	Contaminada sin saturar	Contaminada saturada
Humedad inicial [%]	31,04	30,74	30,40	31,36
Relación de vacíos inicial	1,51	1,56	1,72	1,66
Peso unitario Húmedo [kN/m ³]	14,57	14,30	13,23	13,87
Peso unitario Seco [kN/m ³]	11,10	10,93	10,27	10,57
Cohesión (c) [kPa]	25	8	8	4
Fricción (φ) [°]	24	23	29	27

Fuente: Los autores

Como puede observarse, a pesar de aumentar el ángulo de fricción en la muestra contaminada debido a las agregaciones que se forman (registradas en la MEB), estas no son fuertes porque junto con el notable descenso de la cohesión, la resistencia de la muestra contaminada es mucho menor sin saturar que en la muestra en estado natural, mostrando el efecto negativo que tiene en la resistencia del suelo la contaminación. Además, se observa que hay una notable diferencia entre las resistencias de las muestras saturadas y las muestras sin saturar. En general, puede verse como el proceso de contaminación actúa en la resistencia del material como si éste estuviera sufriendo un proceso de saturación.

5.4.2. Compresión simple

Bajo las mismas condiciones de humedad en los dos suelos, se observó que para fallar la muestra contaminada, se necesitó solo del 92% del esfuerzo aplicado para fallar la muestra no contaminada, bajo el mismo nivel de deformación. Los resultados obtenidos muestran una disminución de la resistencia al esfuerzo compresivo, tal disminución se relaciona directamente con el proceso de lixiviación al que ha sido sometida la muestra contaminada. Para eliminar otra variable en la comparación, se normalizaron los valores de resistencia última (Qu) con los respectivos valores de relación de vacíos. Esta normalización se realiza dividiendo la resistencia última entre la relación de vacíos (Qu/e). Los resultados obtenidos muestran que para la muestra natural con una resistencia última de 141,53 kN/m³ y una relación de vacíos de 1,54, se obtuvo un valor de resistencia normalizada de 91,90 kN/m³, y para la muestra contaminada con una resistencia última de 130,24 kN/m³ y una relación de vacíos de 1,69, se obtuvo un valor de resistencia normalizada de 77,07 kN/m³. Esto confirma lo dicho anteriormente, que la resistencia disminuye por efecto de la contaminación a la que fue inducida la muestra. Dicha reducción de la resistencia también se puede analizar, relacionando la succión matricial en pF y el índice de vacíos; para la humedad de cada material. La succión en la muestra natural para una humedad de 32% es mayor, mientras que para la contaminada es menor para un valor de humedad de 31%, lo que indica que a mayor succión, mayor resistencia. La resistencia frente a la succión normalizada (pF/e), muestra mejores resultados para la muestra natural que para la contaminada, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4.

Parámetros de resistencia y succión de las muestras analizadas.

Muestra	Qu [kN/m ³]	Relación de vacíos (e)	Succión [kPa]	pF	pF/e
Natural	141,53	1,54	150	3,18	2,07
Contaminada	130,24	1,69	40	2,61	1,54

Fuente: Los autores

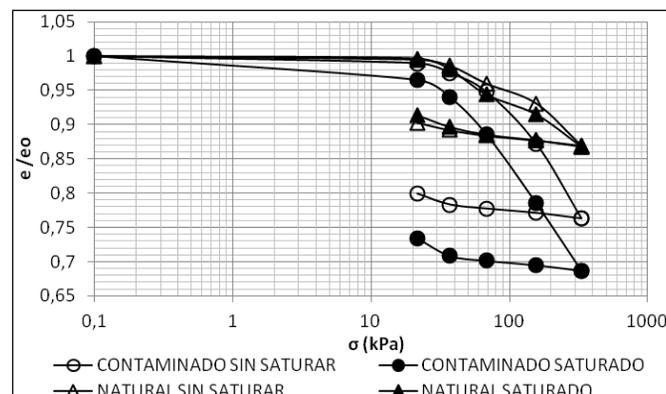


Figura 5. Curvas de consolidación normalizadas de las muestras natural y contaminada.

Fuente: Los autores

5.4.3. Ensayos duplo-edométricos

El fenómeno de colapso se produce en los suelos porosos no saturados, que a causa de situaciones externas, se ven afectados con cargas que generan asentamientos bruscos, efecto que al combinarse con aumentos de saturación, desestabilizan la estructura interna del suelo. Los suelos meta estables o colapsibles se caracterizan por que sus partículas están unidas por vínculos que al removerse generan deslizamientos entre las mismas ocupando los vacíos [15].

Al analizar las curvas de compresibilidad de las muestras natural y contaminada en los estados saturado y no saturado (Fig. 5); se observa que tanto en la muestra natural como en la contaminada hay mayores cambios de volumen en el estado saturado que en el estado natural. Sin embargo, en la muestra contaminada se aprecian mayores deformaciones, esto se debe a que la muestra contaminada deja susceptibles los puentes que conectan las partículas a perderse con la saturación, registrando así, deformaciones mayores [15].

Para medir el índice de colapso de las muestras estudiadas se hará uso de las siguientes ecuaciones [16]:

$$I = \frac{\Delta e_c}{\left[1 + \left(\frac{e_{nat}}{e_{o(nat)}} \right) \times e_{o(medio)} \right]}$$

$$\Delta e_c = \left[\left(\frac{e_{nat}}{e_{o(nat)}} \right) - \left(\frac{e_{sat}}{e_{o(sat)}} \right) \right] \times e_{o(medio)}$$

$$e_{o(medio)} = \frac{(e_{o(nat)} + e_{o(sat)})}{2}$$

En la Fig. 6, se presentan los resultados obtenidos del índice de colapso. Se observa que para la muestra contaminada se obtuvo un índice de colapso de 5,8% correspondiente a una carga crítica de 155,84 kPa, mientras que para la muestra natural se obtuvo un índice de colapso de 0,95% correspondiente a la misma carga crítica de 155,84 kPa. Comparando las dos curvas se ve claramente que para tensiones verticales iguales, el índice de colapso en la muestra contaminada es 6 veces mayor que el de la muestra natural, esto se debe, como fue mencionado a las reacciones químicas debidas a los lixiviados de los desechos orgánicos, que debilitan las conexiones entre las partículas de suelo, haciéndolo más vulnerable al colapso y pasando a clasificar el suelo de moderadamente problemático a problemático [17].

5.4.4. Determinación de la curva característica de retención de agua (succión)

En la Fig. 7, se muestran las curvas características de retención de agua de las muestras natural y contaminada. Se puede observar claramente una diferencia entre la succión matricial y la succión total de ambas muestras, siendo más marcada en la muestra contaminada, indicando un efecto químico más fuerte (Por aumento de sales en la muestra como se ve en la Tabla 2). El ingreso de fluidos contaminantes en

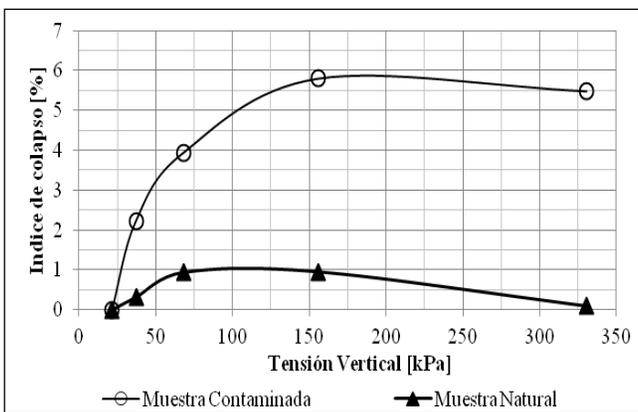


Figura 6. Índice de colapso para las muestras estudiadas. Fuente: Los autores

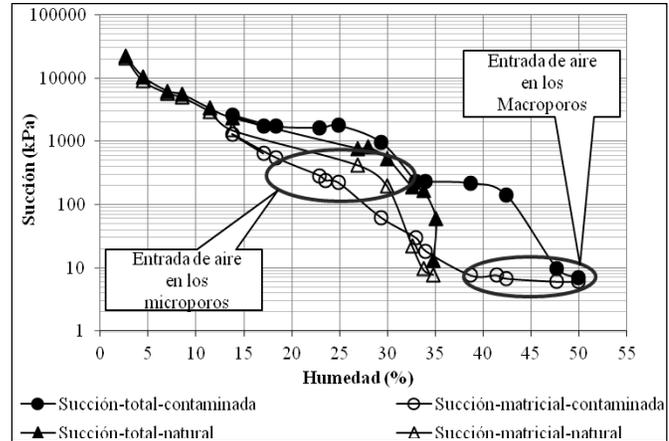


Figura 7. Curvas características de las muestras natural y contaminada. Fuente: Los autores

el suelo cambia la composición química del fluido intersticial y se puede esperar una alteración de la succión osmótica [18].

Para la muestra natural se observa una ausencia de una región marcada de macroporos, claramente definida en la muestra contaminada, aspecto estructural que se confirma con los resultados obtenidos en el ensayo de microscopía electrónica de barrido. Adicionalmente, al estar la curva de succión matricial del suelo natural por encima en la región de los microporos, indica microporosidad menor en la muestra natural comparada con la muestra contaminada. Como la estructura de la muestra natural es más cerrada que la estructura de la muestra contaminada, las propiedades mecánicas se ven claramente afectadas.

6. Conclusiones

- Ante las variaciones presentadas en las propiedades y comportamiento del suelo por la acción de los lixiviados contaminantes, se pudo constatar que si los lixiviados generados por los depósitos de residuos sólidos no reciben un adecuado sistema de recolección y avanzan a los suelos de fundación, se pueden ver afectadas desfavorablemente algunas de sus propiedades geotécnicas como índice de vacíos, estructura, química, resistencia a la compresión, resistencia al corte, colapso y succión, convirtiéndose en un riesgo inminente para la población. Se resalta la necesidad de generar conciencia no solo en las autoridades ambientales sino en la comunidad en general en regular la disposición final de residuos sólidos en lugares que cumplan con todas las normativas para el manejo integral de los residuos y sus lixiviados. Lo cual evitará una contaminación al suelo de fundación con consecuentes problemas geotécnicos de consideración.
- Los resultados obtenidos y las conclusiones derivadas de ésta investigación solo pueden ser aplicables a materiales con las mismas características químicas, mineralógicas, físicas y estructurales, ya que las alteraciones en el comportamiento dependerán no solo del tipo de residuos

utilizado sino también del tipo de material que va a ser contaminado.

- Es posible que el tiempo de exposición a los residuos sólidos al que fue sometido el material contaminado no hubiera sido suficiente para generar en la muestra cambios mineralógicos importantes que ocasionen mayores variaciones en las propiedades que los encontrados, por eso se recomienda aumentar dicho tiempo o trabajar directamente con un suelo de fundación de un botadero antiguo.

Agradecimientos

A todos aquellos que de una u otra forma contribuyeron con los resultados de sus ensayos para el desarrollo de esta investigación. A la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín.

Bibliografía

- [1] ABNT, Resíduos sólidos-Classificação, 1987.
- [2] Oliveira Dos Santos, A.M e Brito, S.N.A., Geologia de engenharia. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. São Paulo. BR. 1998, 586 P.
- [3] Rodriguez, G., Gonzalez, H. & Zapata, G., Geología de la Plancha 147 Medellín Oriental. Medellín. 2005
- [4] Norma ASTM. D2216-10 Standard test methods for laboratory determination of water (Moisture) content of soil and rock by mass.
- [5] Norma ASTM. D854-10 Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer.
- [6] Norma ASTM. D422-63(2007) Standard test method for particle-size analysis of soils.
- [7] Norma ASTM. D4318-10 Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils.
- [8] Nogami, J. and Villibor, D., Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. Brasil. Ed. Vilibor, São Paulo, SP, 1995.
- [9] Norma ASTM. D3080-04 Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions.
- [10] Norma ASTM. D2166-06 Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil.
- [11] Norma ASTM. D2435-04 Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading.
- [12] Norma ASTM. D5298-10 Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper.
- [13] Santos, R.M.M., Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no município de Goiânia. Tesis de Mestrado em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, GDM-044A/97, 1997, 120 P.
- [14] Valencia, Y., Influencia de la meteorización en las propiedades y comportamiento de dos perfiles de alteración originados de rocas metamórficas. Tesis Maestría en Ingeniería Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2005.
- [15] Zuluaga, M., Monsalve, J., Ocampo, S. y Valencia, Y., Efecto del depósito de residuos sólidos urbanos en las propiedades físico-químicas y mecánicas de un suelo tropical laterítico del Batolito Antioqueño (Colombia). Artículo aceptado para publicación en: COBRAMSEG2010, Brasil, 2010.
- [16] Jennings, J.-E. and Knight, K., A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to "collapse of grain structure", Regional conference for african on soil mechanics and foundation engineering, durban, 1975. pp. 99-105.
- [17] Valencia, Y., Yepes, J. y Echavarría, O., Evaluación por diferentes métodos del potencial de colapso de algunos suelos residuales en los Valles de Aburrá y San Nicolás. Boletín de Ciencias de la Tierra (38), pp. 60-64, 2015. ISSN 0120 – 3630.
- [18] Da Silva, J., Estudo da colapsabilidade da argila porosa de Brasília pelo fluxo de contaminantes. Tesis de Mestrado Em Geotecnia. Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2006.

A. Quintero-Ramírez, graduado de Ing. Civil de la Universidad Nacional de Colombia, en el año 2011. Ha trabajado en consultoría en geotecnia desde 2011 y actualmente es estudiante de Maestría en Ingeniería Geotécnica de la Universidad Nacional de Colombia. Dentro de las líneas de investigación se incluye los suelos tropicales, los suelos residuales y la contaminación de suelos.
ORCID: 0000-0001-8349-2853

Y. Valencia-González, graduada de Ing. Civil de la Universidad Nacional en el 2001, con MSc. en Ingeniería – Geotecnia en el 2005 de la Universidad Nacional de Colombia. En el 2009 recibió su título de Dra. en Geotecnia y posteriormente realizó un año de estudios posdoctorales en la Universidad de Brasilia en Brasil. Actualmente es profesora Asociada del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Sus líneas de investigación son: suelos tropicales, biotecnología, fundaciones y control de vibraciones.
ORCID: 0000-0002-5389-2212

L.A. Lara-Valencia, graduado de Ing. Civil de la Universidad Nacional en el 2005, con MSc. en Estructuras y Construcción Civil en el 2007 de la Universidad de Brasilia. En el 2011 recibió su título de Dr. en Estructuras y Construcción Civil en la Universidad de Brasilia en Brasil. Actualmente es profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Sus líneas de investigación son: Control de vibraciones, dinámica de estructuras y suelos tropicales.
ORCID: 0000-0002-2718-6234