

Cambio en las propiedades geotécnicas de un suelo sometido a ignición en laboratorio

Yamile Valencia González*
Juliana Patiño Restrepo**
María Camila Álvarez Guerra***
Daniel Ortega Ramírez****
Óscar Echeverri Ramírez*****

Recibido: 25/10/2016 • Aceptado: 01/09/2017

DOI: 10.22395/rium.v17n32a5

Resumen

Las zonas tropicales son regiones sometidas a ambientes cálidos, y sus suelos, en especial en aquellas áreas cubiertas de vegetación, pueden estar expuestos a eventos como los incendios. Las altas temperaturas que se pueden alcanzar en estos eventos causan variaciones en algunas de las propiedades geotécnicas de los suelos, influenciando el comportamiento del material, y pueden dar origen a procesos erosivos, que en muchos casos preceden a movimientos en masa. El siguiente artículo expone lo que ocurre en un suelo sometido a un proceso de ignición en el laboratorio, analizando las variaciones en algunas propiedades físicas (contenido de humedad, límites de Atterberg, gravedad específica y granulometría), químicas (pH y capacidad de intercambio catiónico), mineralógicas, estructurales y mecánicas (succión, desagregación y pinhole test); mostrando claramente que el material se torna más ácido con mayor relación de vacíos, menor capacidad de intercambio catiónico, menor cantidad de caolinita, plasticidad y succión, y variación en su textura, con un consecuente aumento en la erodabilidad.

Palabras clave: altas temperaturas; propiedades geotécnicas; erodabilidad.

* Profesora Asociada, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. yvalenc0@unal.edu.co

** Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. jpatinor@unal.edu.co

*** Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. macalvarezgu@unal.edu.co

**** Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. daortegara@unal.edu.co

***** Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. oecheve@unal.edu.co

Change in Geotechnical Properties of a Soil Subject to Laboratory Ignition

Abstract

Tropical areas are regions subject to warm environments and their soils, especially in areas covered with vegetation, may be exposed to events such as fires. The high temperatures that can be reached in these events cause variations in some of the geotechnical properties of soils, influencing the behavior of the material, and can give rise to erosive processes, which in many cases precede mass movements. The following article describes what happens in a soil that has undergone an ignition process in the laboratory, analyzing the variations in some physical (moisture content, Atterberg limits, specific gravity and granulometry), chemical (pH and cation exchange capacity), mineralogical, structural and mechanical (suction, disintegration and pinhole test) properties; clearly showing that the material becomes more acidic with a higher void ratio, less cation exchange capacity, less kaolinite, plasticity and suction, and variation in texture, with a consequent increase in erodibility.

Keywords: high temperatures; geotechnical properties; erodibility.

Mudanças nas propriedades geotécnicas de um solo submetido à ignição em laboratório

Resumo

As zonas tropicais são regiões submetidas a ambientes quentes, e seu solo, em especial naquelas áreas cobertas de vegetação, podem estar expostos a eventos como os incêndios. As altas temperaturas a que podem chegar nesses eventos causam variações em algumas das propriedades geotécnicas dos solos, influenciando o comportamento do material, e podem dar origem a processos de erosão que, em muitos casos, precedem a movimentos em massa. Este artigo expõe o que ocorre num solo submetido a um processo de ignição em laboratório analisando as variações em algumas propriedades físicas (conteúdo de umidade, limites de Atterberg, gravidade específica e granulometria), químicas (pH e capacidade de intercâmbio catiônico), mineralógicas, estruturais e mecânicas (sucção, desagregação e pinhole test); mostra claramente que o material se torna mais ácido com maior relação de vazios, menor capacidade de intercâmbio catiônico, menor quantidade de caulinita, plasticidade e sucção, e variação em sua textura, com um consequente aumento na erodibilidade.

Palavras-chave: altas temperaturas; propriedades geotécnicas; erodibilidade.

INTRODUCCIÓN

El fuego está presente naturalmente en la mayoría de los ecosistemas ajustando su estructura y permitiendo mantener su diversidad y estabilidad [1]. En Colombia los incendios son un tema que ha ganado relevancia debido a las fuertes temporadas cálidas que se han experimentado en los últimos años. Muchos de los estudios relacionados con el tema suelen estar asociados principalmente a las afectaciones de las coberturas vegetales, pero típicamente no se ha avanzado mucho en la influencia de estos fenómenos sobre las propiedades geotécnicas de las capas del suelo sub-superficial.

Los incendios forestales inciden negativamente sobre el medio ambiente y en particular sobre el ecosistema afectado; por ellos es necesaria una evaluación rigurosa del daño ocasionado para emprender acciones efectivas que permitan su regeneración. En este sentido, el suelo como componente fundamental de este ecosistema puede llegar a sufrir modificaciones importantes en sus propiedades químicas y físicas [2].

En relación con los atributos químicos existen innumerables trabajos en la literatura que indican aumento en los contenidos de N, P, K, Ca, y Mg mineralizados inmediatamente después del proceso de ignición, con una consecuente elevación del pH [3,4], en función de la ceniza que tiene alta concentración de algunos de estos nutrientes [3], así como de la degradación de casi toda la materia orgánica [4]; al descender el contenido de materia orgánica a bajos niveles, se genera una pérdida de los complejos arcillo-húmicos, vitales para la resistencia del suelo a la erosión y al transporte [2].

En cuanto a los atributos físicos de un suelo, los incendios forestales pueden ocasionar cambios texturales. Se ha observado, en zonas afectadas por el fuego, aumento de partículas gruesas, como arenas y gravas [5] [6] y disminuciones, por tanto, en los contenidos de partículas finas como arcilla y limo. Los minerales de la fracción arcilla pueden modificar su estructura por la acción de las altas temperaturas; estos cambios están relacionados con la intensidad del fuego y se hacen visibles solo cuando los minerales de la arcilla son susceptibles de variar con el calor [7]. Adicionalmente, el fuego puede causar modificaciones en la tasa de infiltración [8] y evaporación del agua, en la porosidad y en el aumento del grado de susceptibilidad de los suelos a la erosión hídrica y eólica [9]. Si tras la acción del fuego la cobertura vegetal no se recupera antes de que se produzcan las primeras lluvias de carácter torrencial, el impacto de las gotas de agua sobre el suelo desnudo contribuirá a destruir los agregados [10]. Las fracciones más finas taponarán los poros, reducirán la velocidad de infiltración, aumentarán la escorrentía [11], favorecerán la erosión superficial y contribuirán al desencadenamiento de movimientos en masa [12].

A partir del siguiente estudio se pretende mostrar, de forma detallada, los cambios que se presentan en algunas propiedades geotécnicas de un suelo ubicado en la región tropical en estado natural cuando pasa por un proceso de ignición en laboratorio, que permite simular lo que podría ocurrir cuando un suelo es sometido a un incendio.

1. LOCALIZACIÓN Y GEOLOGÍA

La muestra de suelo para la ejecución de los ensayos se extrajo de una vertiente; específicamente el material fue tomado de la zona noroccidental del municipio de Medellín en predios de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional (coordenadas $6^{\circ}16'30.31''\text{N}-75^{\circ}35'32.87''\text{O}$; altitud de 1554 msnm) (figura 1). En el sector, la precipitación y temperatura promedio anual son de 1571 mm y 24°C , respectivamente [13].

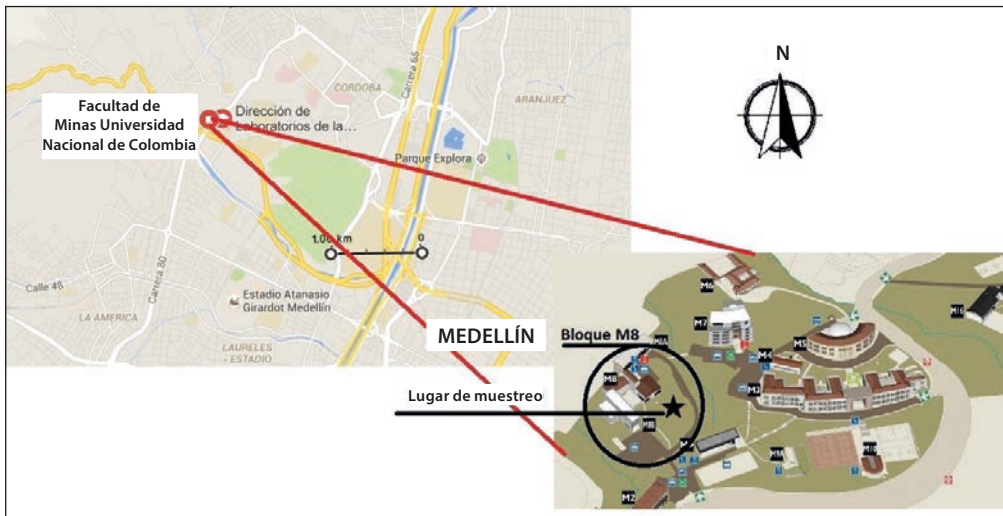


Figura 1. Ubicación del sitio de extracción

Fuente: elaboración propia

Predominan en el área de vertiente los flujos de lodo y escombros, distribuidos en forma aleatoria, que suprayacen a los suelos residuales derivados de la Anfibolita de Medellín. En la zona los flujos están recubiertos por delgadas capas orgánicas y en algunos sectores están mezclados o cubiertos por llenos antrópicos. El suelo fino que conforma el flujo de lodos o que embebe como matriz al flujo de escombros es de naturaleza limo-arcillosa, arcillo-arenosa o limo-arenosa [13].

Los flujos de lodos se diferencian por su color amarillento y gris, y se encuentran cubriendo los flujos de escombros. En estos últimos predomina una matriz fino-granular limosa (MH o ML) con variaciones locales a arcillosa o arenosa (CL o SM) [14].

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

De la zona de estudio se extrajeron muestras a una profundidad entre 0,5 y 0,7 m, como se presenta en la figura 2. Las muestras extraídas fueron del tipo inalteradas (tubos shelby y bloques) y remoldeadas (bolsas plásticas), y corresponden al flujo de lodos descrito anteriormente. Con el material alterado se realizaron ensayos de determinación del contenido de humedad, límites de Atterberg, gravedad específica, granulometría por mallas e hidrómetro, determinación de pH (H_2O y KCl), capacidad de intercambio catiónico (CIC), miniatura compactada tropical-rápida (MCT) y difracción de rayos X. Con las muestras inalteradas se efectuaron ensayos de microscopía electrónica de barrido (MEB), succión por el método del papel filtro, desagregación y *pinhole test*.

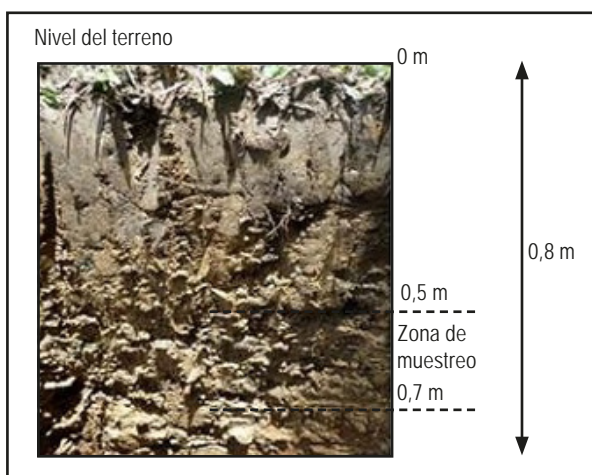


Figura 2. Perfil del suelo estudiado.

Fuente: elaboración propia

Cada uno de los ensayos fue realizado siguiendo las Normas ASTM, las cuales se especifican para cada ensayo, además de verificar la repetitividad en los procedimientos.

Para comparar la influencia de la temperatura, todos los ensayos fueron ejecutados tanto con el suelo en estado natural como con el suelo después de ser sometido a ignición en laboratorio, por medio de una mufla, manteniendo una temperatura de 1000 °C durante 30 min, y 1 hora y 30 min, dependiendo del tamaño de la muestra para garantizar la ignición (figura 3). Se seleccionó dicha temperatura considerando que aproximadamente hacia los 980 °C la estructura de los suelos comienza a modificarse [15].

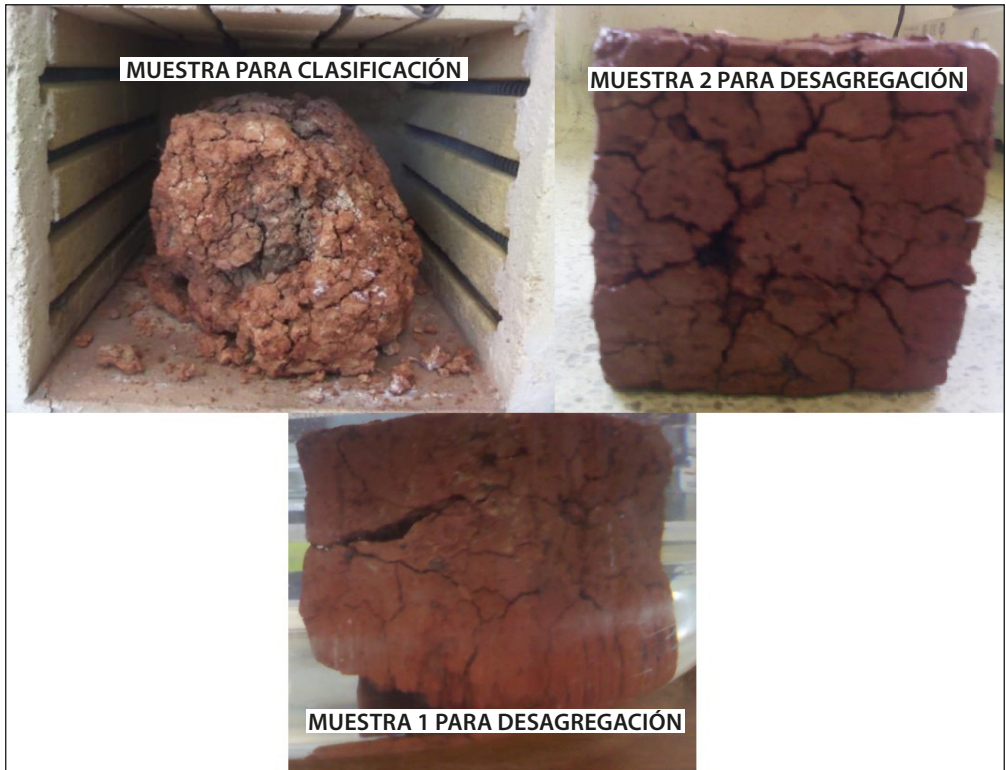


Figura 3. Suelo después de ignición.

Fuente: elaboración propia

3. CARACTERIZACIÓN FÍSICA

Los ensayos de caracterización física, como contenido de humedad, límites de Atterberg, gravedad específica, granulometría por tamizado y lavado sobre la malla N° 200, se realizaron de acuerdo con las normas ASTM [16-20], respectivamente, y con la finalidad de evaluar las propiedades índice del material.

Miniatura compactada tropical (MCT)-rápida

Este ensayo fue implementado por Nogami y Cozzolino en 1985 [21], y básicamente consiste en realizar una clasificación rápida de los suelos con base en la contracción del diámetro y la penetración de unas pastillas moldeadas en anillos de, aproximadamente, 5 mm de espesor y 20 mm de diámetro. Dicha clasificación divide los suelos tropicales en dos grupos, laterítico (L) y no laterítico (N) y en cuatro subgrupos, arenas (A), arenoso (A'), arcilloso (G') y limoso (S') (figura 4).

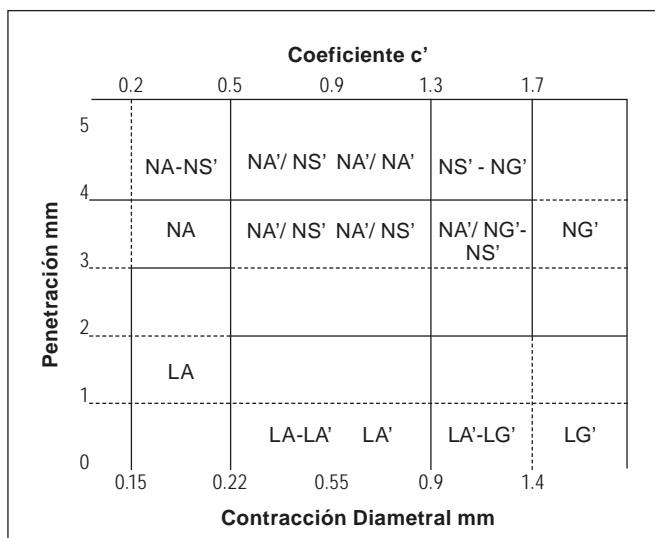


Figura 4. Diagrama clasificación MCT rápida

Fuente: [20]

4. ANÁLISIS QUÍMICO, MINERALÓGICO Y ESTRUCTURAL

Determinación del pH del suelo

Para establecer si existe una variación en la acidez o alcalinidad y definir también el predominio en el nivel mineralógico del suelo estudiado antes y después de la ignición, se debe determinar el pH del suelo. Para ello, se realiza la prueba correspondiente a la Norma ASTM [22] en agua y en solución de cloruro de potasio (KCl); la diferencia entre estos dos valores (ΔpH), en el caso de ser positiva, indica predominio de oxihidróxidos de hierro y aluminio; por el contrario, si este valor es negativo indica prevalencia de arcillominerales [23]. La alcalinidad del suelo se clasifica según los rangos de la tabla 1, a partir del pH en agua.

Tabla 1. Clasificación del pH de un suelo

| <i>Denominación</i> | <i>Rango</i> |
|-----------------------|--------------|
| Ultra ácido | < 3,5 |
| Extremadamente ácido | 3,5 - 4,4 |
| Muy fuertemente ácido | 4,5 - 5,0 |
| Fuertemente ácido | 5,1 - 5,5 |
| Moderadamente ácido | 5,6 - 6,0 |

| <i>Denominación</i> | <i>Rango</i> |
|------------------------|--------------|
| Ligeramente ácido | 6,1 - 6,5 |
| Neutro | 6,6 - 7,3 |
| Ligeramente alcalino | 7,4 - 7,8 |
| Moderadamente alcalino | 7,9 - 8,4 |
| Fuertemente alcalino | 8,5 - 9,0 |

Fuente: [38]

Determinación de algunos elementos químicos

En estos ensayos se obtiene el valor del contenido de materia orgánica, aluminio (usando KCl 1M), calcio, magnesio, sodio, potasio (usando acetato de amonio 1M) y de la capacidad de intercambio Catiónico (CIC) del suelo, definida como la capacidad que tiene un suelo para retener y liberar iones positivos, y es constituida por la suma de cationes básicos Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ y de cationes ácidos H^+ , Al^{+++}) [10].

El método usado para la determinación del contenido de materia orgánica es AS-07, de Walkley & Black [24].

Difracción de rayos X

Este método se establece en [25] y es muy usado en la identificación de minerales en suelos de grano fino, y consiste en determinar los espaciamentos entre los planos atómicos y los ángulos incidente y difractado, correspondientes al momento en que ocurre la difracción de los rayos X sobre el material; estos dos parámetros han sido identificados para muchos materiales cristalinos, por ende, la clasificación de los minerales se realiza de forma comparativa por medio de difractogramas [26]. La confrontación de los resultados de la muestra natural y la quemada al horno permite determinar los cambios mineralógicos generados por el proceso de ignición.

Microscopía electrónica de barrido (MEB)

El microscopio empleado por esta técnica funciona por medio de un campo electrónico en donde inciden rayos de electrones, en cuya interacción adquieren energía cinética que al impactar sobre la muestra provoca una disipación de una serie de señales que generan una imagen, que permite estudiar la estructura del material. Por medio de este instrumento se puede, además, analizar la composición química del suelo y corroborar la presencia de ciertos minerales a través de su morfología o de los elementos presentes [27].

5. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

Para la caracterización mecánica de los suelos, se realizaron ensayos de *pinhole test*, desagregación y succión por el método del papel filtro.

Los procedimientos de los ensayos de corte directo, succión por el método del papel filtro y *pinhole test*, se realizaron según las normas ASTM [28, 29] y la norma brasilera ABNT-NBR [30]. El ensayo de desagregación no cuenta con norma acreditada, se siguieron los procedimientos recomendados en Camapum *et al* [31].

Pinhole test

El ensayo de *pinhole test* proporciona una medida cualitativa y cuantitativa de la erodabilidad interna de los suelos. Su procedimiento consiste en realizar un agujero de 1 mm de diámetro en todo el centro longitudinal de una muestra cilíndrica con el objetivo de simular grietas o fracturas de una masa de suelo; por este orificio se hace fluir agua con varias cargas hidráulicas y se obtiene un promedio de caudales [30]. La finalidad de este ensayo es estudiar el efecto de arrastre de partículas de suelo por la circulación del agua, mediante la relación carga-descarga vs cabeza hidráulica [31].

Desagregación

El ensayo de desagregación consiste en labrar dos muestras cúbicas de 6 cm de lado; una de las muestras se somete a inmersión total en agua destilada y la otra a una inmersión parcial agregando una cantidad de agua destilada equivalente a 1/3 de la altura de la muestra cada 15 minutos hasta cubrir totalmente la misma; a medida que se agrega el agua se anotan los cambios sufridos en la muestra. Después de transcurridas 24 horas se observan las muestras y de forma cualitativa se evalúan sus variaciones para analizar su estabilidad o desagregación [31].

Succión por el método del papel filtro

Este ensayo se efectúa siguiendo la norma ASTM [29] de forma que determina tanto la succión matricial como la succión total. En el caso del suelo natural el ensayo se realizó siguiendo trayectoria mixta de humedad; o sea, se partió de la humedad natural y a partir de esta se humedecieron y se secaron las pastillas. Para la muestra sometida a ignición, debido a la dificultad de moldear pastillas después de quemadas, se optó por moldearlas y luego quemarlas en el horno, por lo que el proceso de humedecimiento se dio a partir de muestra seca y agregando agua hasta el máximo contenido de humedad que pudieran tener las mismas.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Caracterización física

En la tabla 2 se presenta el resumen de algunas de las propiedades índice del suelo tanto natural como quemado.

Tabla 2. Propiedades físicas del material.

| | <i>Suelo natural</i> | <i>Suelo quemado</i> |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|
| Contenido de humedad natural (%) | 36 | NA |
| Saturación inicial (%) | 78 | 0 |
| Límite plástico (%) | 41 | NP |
| Límite líquido (%) | 75 | 53 |
| Índice de plasticidad (%) | 34 | NP |
| Gravedad específica | 2,53 | 2,96 |
| Índice de vacíos inicial | 1,2 | 1,8 |

NA (No aplica), NP (No presenta)

Fuente: elaboración propia.

Estudios previos han mostrado cómo los incendios forestales pueden ocasionar cambios texturales en los suelos, causando aumento de partículas gruesas, como arenas y gravas, y disminuciones, por tanto, en los contenidos de partículas finas como arcilla y limo [2, 5, 6]. En este caso se observa cómo la temperatura claramente afecta las propiedades índice del suelo: inmediatamente después del fuego el material pasa de un limo de alta plasticidad (MH) en estado natural, a generar agregaciones cambiando la textura por tamaños más gruesos tipo arena (SP) al quemarse (figura 5), disminuyendo sus límites. En el caso de la gravedad específica, se evidencia un aumento al pasar de un estado a otro, que da indicios de cambios en la composición mineralógica; sin embargo, esto se verifica con los resultados del ensayo de difracción de rayos X. En cuanto a la relación de vacíos se dio un incremento debido a la desecación extrema de la muestra que genera aglomeración y grietas y, por ende, un aumento en los vacíos del suelo.

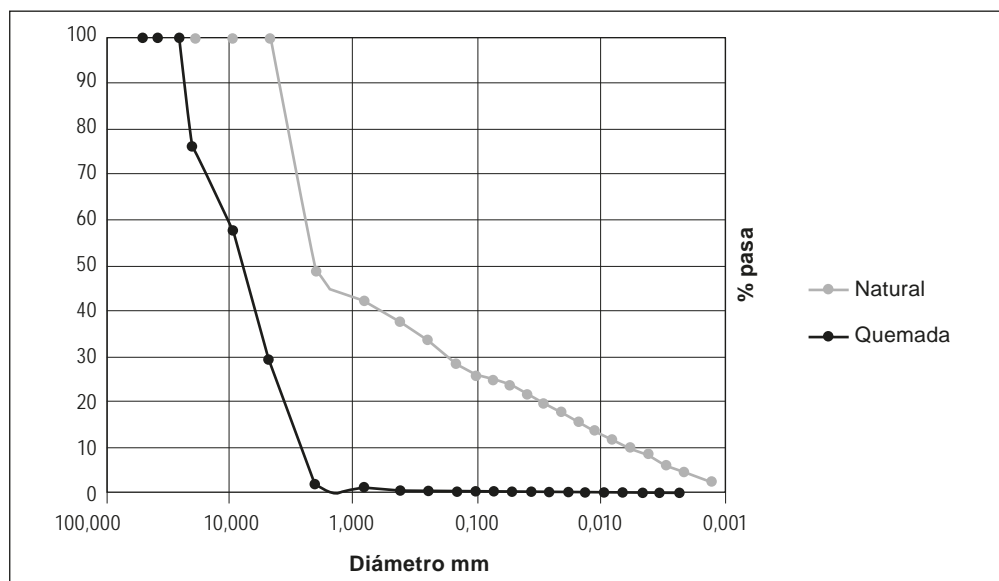


Figura 5. Curvas granulométrica SNat SQ

Fuente: elaboración propia

MCT rápida

Según la clasificación MCT rápida el suelo natural se clasifica como LG' (arcillas lateríticas y arcillas lateríticas arenosas) y el suelo quemado como NA (arena no laterítica), resultados que concuerdan con lo obtenido en la granulometría y lo reportado en la literatura [2], donde se pasó de una textura fina a una textura gruesa. La clasificación MCT se hace con base en la tabla propuesta por Nogami [21].

7. ANÁLISIS QUÍMICOS

Determinación de pH del suelo

Con relación al pH del material, la mayoría de las investigaciones coinciden en que el pH del suelo aumenta después de las quemaduras, pero en este caso disminuyó, mostrando como ocurrió en los estudios posteriores al año 2002, que el pH del suelo disminuye el primer mes, y aumenta poco tiempo después (tabla 3) [32]. Con la disminución del pH se pasa de un suelo moderadamente ácido a extremadamente ácido por efecto de la temperatura.

Tabla 3. pH de las muestras en agua y KCl.

| <i>Suelo</i> | <i>pH en agua</i> | <i>pH en KCl</i> | ΔpH |
|--------------|-------------------|------------------|-------------|
| Natural | 5,89 | 5,15 | -0,74 |
| Quemado | 3,6 | 4,61 | 1,01 |

pH (Potencial de hidrógeno), KCl (cloruro de potasio), ΔpH (diferencia de pH en KCl y agua)

Fuente: elaboración propia.

La diferencia en el suelo del pH en agua y en KCl muestra también un cambio en la composición mineralógica, ya que para el suelo natural es negativo y para el suelo quemado es positivo, aspecto que puede verificarse en los resultados de difracción de rayos X, donde se pasa de tener una abundante cantidad de arcillo-minerales como la caolinita, a oxihidróxidos de hierro y aluminio como hematita y mullita.

Cantidad de algunos elementos químicos

En la tabla 4, se observa con relación a la capacidad de intercambio catiónico (CIC), que el suelo natural presenta un valor de 9.9 cmolc kg⁻¹ justificado en la alta presencia de caolinita, cuyos valores de CIC varían entre 3 y 15 cmolc kg⁻¹. Posteriormente al quemar el suelo hay un cambio mineralógico importante que hace que su CIC disminuya a 0,8 cmolc kg⁻¹ que puede relacionarse con su aumento en hematita y el paso de cuarzos de baja a cuarzos de alta ya que estos tienen valores de CIC entre 1 y 4 cmolc kg⁻¹ [33]. Al igual que se encontró en otros estudios [2], la disminución en la cantidad de materia orgánica al someter un suelo directamente al fuego, se traduce en un descenso en la capacidad de intercambio catiónico. Todos estos cambios son variaciones de vital importancia no solo en la ingeniería, sino en la agricultura, tal como lo muestran otras investigaciones en el área [3].

Tabla 4. Resultados ensayo determinación de algunos elementos químicos.

| | <i>Textura</i> | | | | <i>pH</i> | <i>CE</i> | <i>MO</i> | <i>Al</i> | <i>Ca</i> | <i>Mg</i> | <i>K</i> | <i>Na</i> | <i>CICE</i> |
|---------|----------------|-----------|------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-------------|
| | <i>A%</i> | <i>L%</i> | <i>Ar%</i> | <i>Clase</i> | | | | | | | | | |
| Quemado | 96 | 2 | 2 | A | 4,8 | | 0,16 | 0,5 | 0,18 | 0,12 | 0,03 | | 0,8 |
| Natural | 18 | 22 | 60 | Ar | 5,4 | | 2,1 | 0,3 | 5,5 | 4,1 | 0,04 | | 9,9 |

A (arena), L (limo), Ar (arcilla), pH (potencial de hidrógeno), MO (materia orgánica), Al (aluminio), Ca (calcio), Mg (magnesio), K (potasio), Na (sodio), CICE (capacidad de intercambio catiónico)

Fuente: elaboración propia.

8. DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

Como se puede observar en las figuras 6 y 7, al realizar el ensayo de difracción sobre la muestra en estado natural, se identificaron y cuantificaron cualitativamente minerales como la goethita, caolinita y cuarzo.

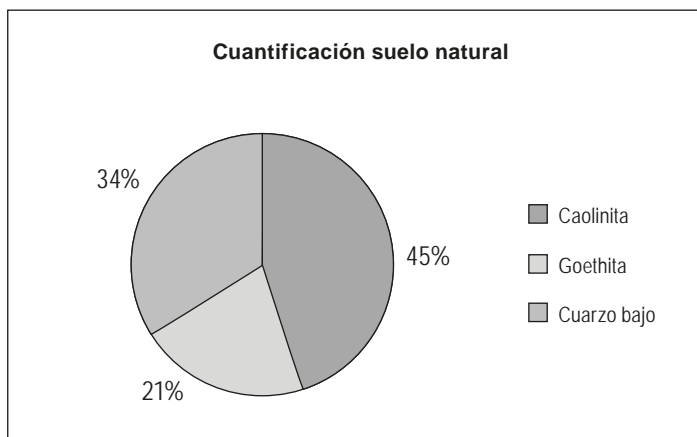


Figura 7. Cuantificación de minerales suelo natural

Es posible que el comportamiento mecánico de este suelo esté fuertemente influenciado por la presencia de la caolinita (arcillo mineral), debido a que existe un alto contenido de la misma, lo que implicaría la existencia de un aporte importante de la cohesión a la resistencia al corte del material.

Adicionalmente, se observó que, al someter el suelo a altas temperaturas, se presentaron cambios en la mineralogía, tal como se ve en las figuras 8 y 9. Dichos cambios consisten en la transformación de los minerales existentes. En estas figuras se ve que la muestra quemada presentó hematita, cuarzo y mullita.

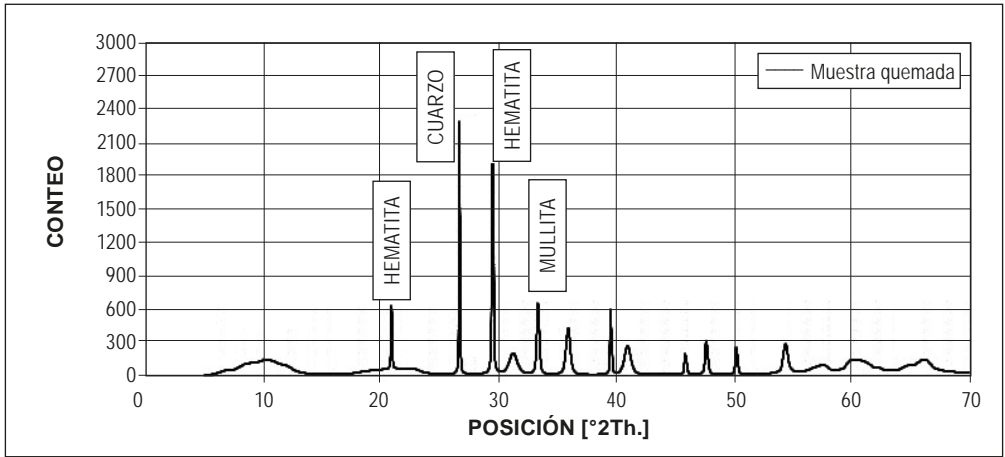


Figura 8. Ensayo de DRX en muestra quemada.

Fuente: elaboración propia

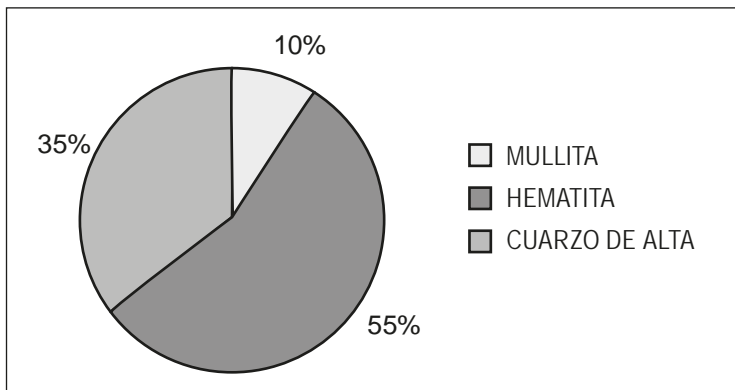


Figura 9. Cuantificación de minerales suelo quemado.

Fuente: elaboración propia

Se considera que parte de la caolinita existente en la muestra natural se transformó en mullita [34], mientras que el cuarzo de baja se transformó en un cuarzo de alta [35] y la goethita dio lugar a la hematita [36].

9. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

Las imágenes obtenidas en el MEB (figura 10) muestran que ambos suelos tienen una estructura similar, homogénea con partículas aplanadas; se observa, además, que el suelo quemado tiene mayor presencia de macroporos, poros de tamaño intermedio y microporos que el suelo natural (producto de las agregaciones), confirmando los resultados obtenidos en la curva característica de retención de agua.

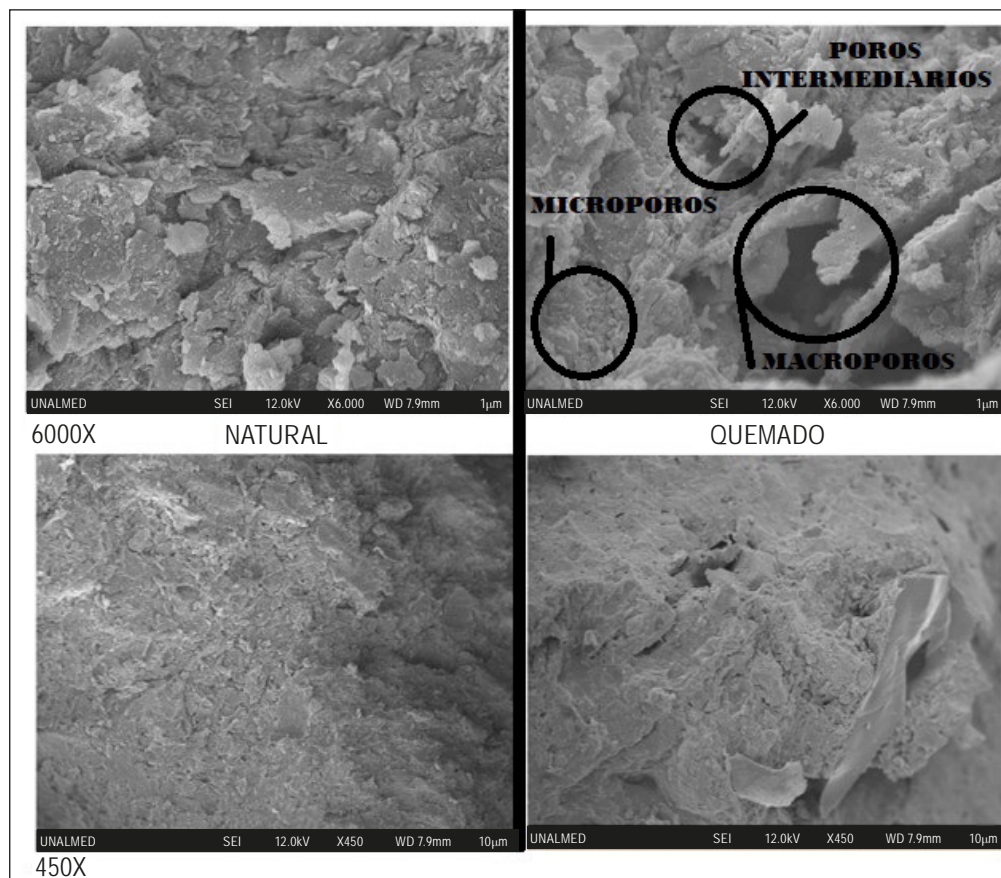


Figura 10. Imágenes MEB suelo natural (izquierda). Suelo quemado (derecha.)

Fuente: elaboración propia

10. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

Pinhole test

En el suelo natural se evidencia un suelo no erodable debido a la escasa variación de los caudales de carga y descarga para una misma cabeza (figura 11), lo que puede estar relacionado con la alta presencia del mineral de caolinita que es estable en presencia de agua [31].

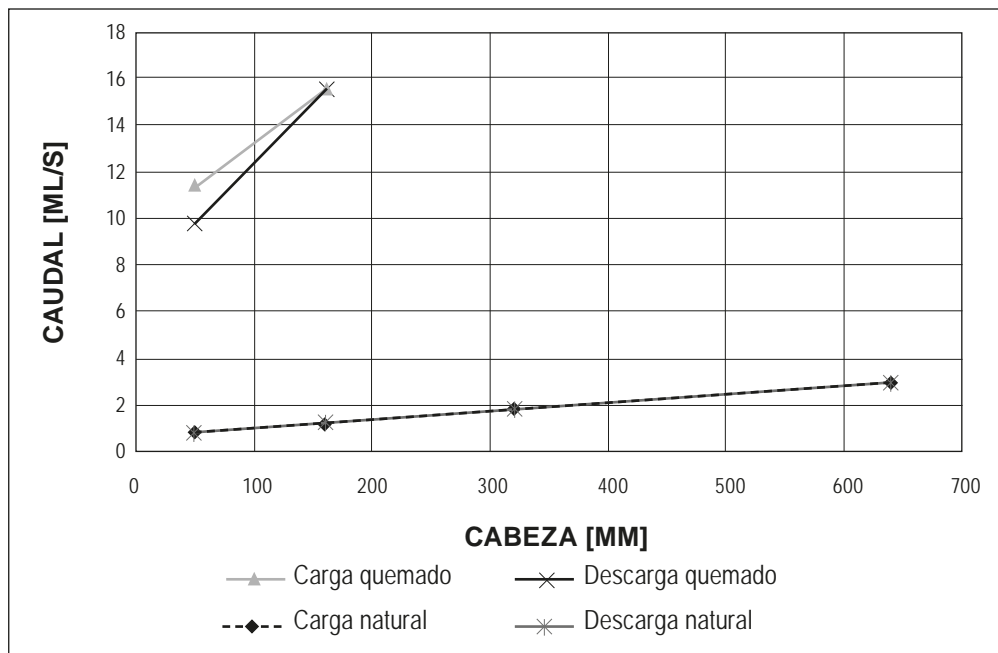


Figura 11. Resultado Pinhole Test suelo natural y suelo quemado.

Fuente: elaboración propia

Por otro lado, el suelo quemado no alcanza cabezas superiores a 160 mm y presenta caudales mayores que el suelo natural; esto se corrobora con la MEB y en el ensayo de succión, donde se observa una estructura más abierta y, por tanto, mayor espacio para la fluencia del agua en el suelo sometido a ignición [37]. De igual forma en el suelo quemado se genera una mayor diferencia entre el caudal de la carga y la descarga, clasificando el material como potencialmente erodable. La literatura registra cómo tras los incendios se ha detectado una reducción de la estabilidad de los agregados, relacionada con la pérdida de materia orgánica o con las características intrínsecas del suelo como es su composición textural [2], aumentando el grado de susceptibilidad de los suelos a la erosión hídrica y eólica [9].

Desagregación

En el ensayo de desagregación para el cubo de suelo natural que estuvo bajo inmersión total, se presentó un desprendimiento parcial de partículas en una esquina; sin embargo, en general conservó su forma y tamaño original. La muestra sometida a inmersión parcial se partió en dos sin disgregarse y sin presentar dispersión de partículas, lo anterior se observa en la figura 12. Este fenómeno sucede por expansión osmótica, evidenciada cuando la concentración de iones en la fase sólida es mayor que en la solución ambiente; en tal caso el agua se mueve por la muestra tratando de disminuir esa concentración, y causa la fractura [31].



Figura 12. Desagregación suelo natural. Izquierda inmersión total. Derecha inmersión parcial.

Fuente: elaboración propia

En la muestra de suelo quemado no se presentó ningún cambio en la forma de los cubos en inmersión total y parcial, ni hubo desprendimiento de partículas; esto puede deberse a que, al tener una muestra totalmente seca, el agua que ingresa no requiere disminuir ninguna concentración iónica, por lo cual la muestra no sufre expansión y, por ende, no presenta desmoronamiento; adicionalmente, la formación de agregaciones le confiere mayor estabilidad (figura 13).

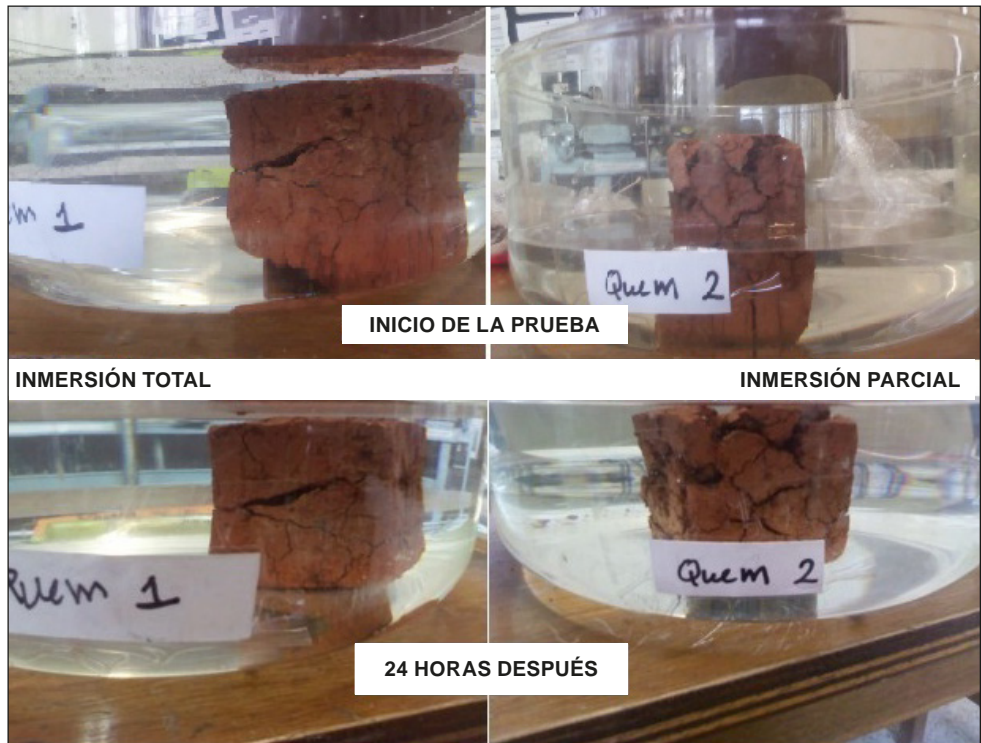


Figura 13. Desagregación suelo quemado. Izquierda inmersión total. Derecha inmersión parcial.

Fuente: elaboración propia

Curva característica de retención de agua

En la figura 14, se observan las curvas características del suelo natural y quemado, tanto para la succión matricial como para la succión total.

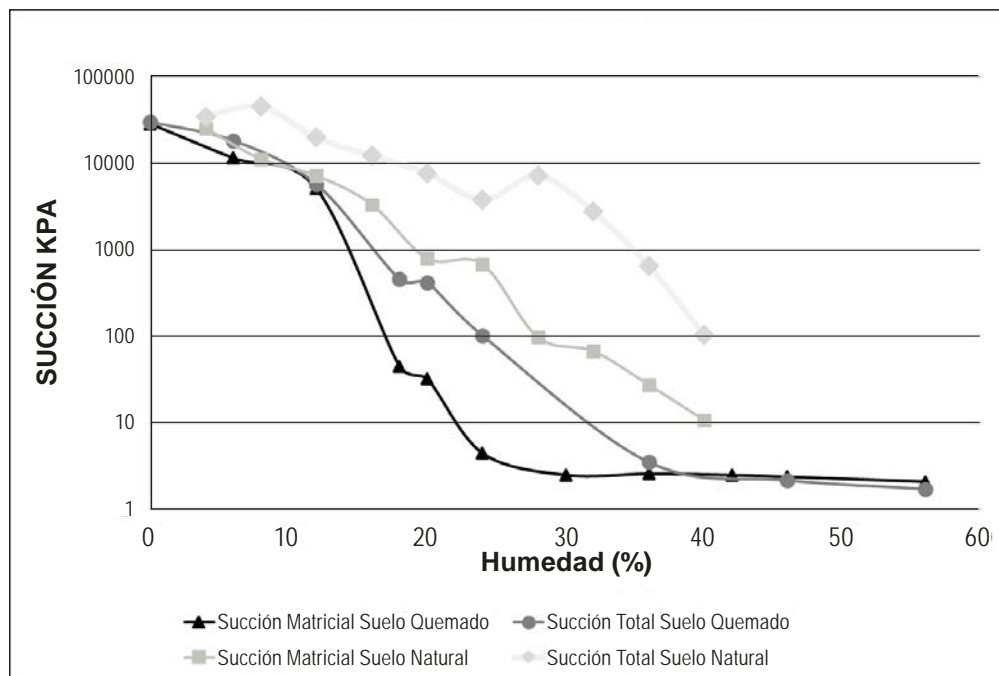


Figura 14. Curvas características suelo natural y suelo quemado.

Fuente: elaboración propia

En el caso de la succión matricial del suelo natural, presenta una curva más suave que la del suelo quemado, revelando una variación progresiva de los vacíos de macroporos a microporos. También al presentar vacíos más pequeños se generan succiones mayores (curva por encima de la del suelo quemado). En la muestra expuesta a ignición, la curva característica evidencia gran cantidad de macroporos (entre 25% y 58% de humedad) y microporos (a partir de 12% de contenido de humedad).

Los poros mayores con succiones menores en la muestra quemada afectan la respuesta mecánica del suelo y lo tornan potencialmente menos competente y más susceptible a procesos de erosión superficial.

Adicionalmente, se puede observar que existe un efecto químico marcado (succión osmótica) en ambas muestras de suelo; en el caso de la muestra natural es más fuerte

en la región de los macroporos, y en el suelo quemado en la región de los poros de tamaño medio.

CONCLUSIONES

Los suelos de zonas tropicales afectados por las altas temperaturas generadas por los incendios sufren grandes cambios en cuanto a su estructura, composición química y mineralogía, que inciden en su comportamiento físico-mecánico. El suelo quemado se torna más ácido, con mayor relación de vacíos y aumento del valor de la gravedad específica de los sólidos, menor capacidad de intercambio catiónico, menor cantidad de caolinita, variación en su textura (de grano fino a grano grueso); su plasticidad y succión disminuyen, con un consecuente aumento en erodabilidad del material, al tener un suelo que permite una mayor circulación de agua a través de él.

Los cambios mineralógicos que sufre el suelo al ser sometido al proceso de ignición son bastante significativos, siendo sumamente importante en el suelo analizado la variación de la caolinita a mullita, que induce un comportamiento mecánico más frágil, lo que implica contar con un material más parecido al de un suelo granular que a uno cohesivo, tornándolo más susceptible a procesos erosivos.

Los suelos sometidos a temperaturas altas presentan frecuentemente inestabilidades, y se erosionan más pronto que cuando no han sido sometidos a dicho fenómeno. Con los resultados anteriores se corrobora que adquieren una estructura más abierta, que disminuye la succión del material y lo convierte en un suelo más erodable y que acumula más agua, factores que pueden propiciar el desencadenamiento de movimientos en masa.

Se recomienda, en futuros trabajos, variar parámetros tales como la temperatura, el tiempo, la cantidad de material expuesto y el tipo de suelo sometido a ignición, que permita una generalización del efecto de la quema en los materiales. Se propone dejar abierto como campo de investigación, efectuar una mayor cantidad de ensayos, teniendo en cuenta que los suelos tropicales presentan gran variabilidad en sus propiedades.

Pero es claro que esta investigación abre un camino importante y les muestra tanto al ingeniero como a la comunidad en general, la gravedad de la ocurrencia de estos fenómenos (incendios) y las potenciales afectaciones en el campo agrícola y geotécnico.

REFERENCIAS

- [1] H. Wright y B. A., *Fire Ecology in the United State and southern Canada*, John Wiley and Sons, New York, 1982.
- [2] J. M. Solera, *Alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelos afectados por incendios forestales. Contribución a su conservación y regeneración. Tesis de Doctorado, Universidad de Alicante*, 321 pp. 1999.
- [3] M. Redin, G. d. F. dos Santos, P. Miguel, G. Denega, M. Lupatini, A. Doneda y E. Lorensi de Souza, *impactos da queima sobre atributos químicos, físicos e biológicos do solo*, *Revista Ciencia Forestal*, v. 21. n.º 2. 2001.
- [4] R. V. Soares, *Queimas controladas: prós e contras, Piracicaba: IPEF: In: Fórum nacional sobre incêndios florestais; reunião conjunta*, 1995, pp. 6-10.
- [5] F. Díaz-Fierros, F. G. Soltres, A. Cabaneiro, T. Carballas y M. C. L. P. & M. V. Celoiro, *Efectos erosivos de los incendios forestales en los suelos de Galicia*, *An. Edafol. Agrobiol*, 41: 627-639. 1982.
- [6] R. C. Graham y A. L. Ulery, *Forest fire effects on soil color and texture*, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 135-140. 1993.
- [7] J. González, G. Gimeno y M. C. Fernández, *Efecto de los incendios forestales sobre el suelo*, *Suelo y Planta*, pp. 72-79. 1992.
- [8] K. Mertens, A. R. Tolossa, V. A., M. Dumon, J. Deckers y E. van Ranst, "Impact of traditional soil burning (guie) on Planosol properties and land-use intensification in south-western Ethiopia", *British Society of Soil Science, Soil Use and Management*, vol. 31, pp. 330-336, 2015.
- [9] E. A. Cassol, D. Martins, D. F. Eltz y R. Falleiro, *Erosividade das chuvas em Taquari, RS, determinada pelo índice EI30, no período de 1963 a 1999, Santa Maria: In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação de Solo e Água*, pp. 15, 2004.
- [10] D. C. Moore y M. J. Singer, *Crust formation effects on soil erosion processes*, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990.
- [11] S. D. Ela, S. C. Gupta y W. J. Rawis, *Macropore And Surface Seal Interactions Affecting Water Infiltration Into Soil*, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56. 714-721, 1992.
- [12] V. Andreu, J. L. Rubio, J. Forteza y R. Cerní, *Long Term Effects Of Forest Fires On Soil Erosion And Nutrient Losses. Soil Erosion As A Consequence Of Forest Fires*. M. Sala y J. L. Rubio, *Logroño: Geoforma Ediciones* 79-90, 1994.
- [13] K. Cano, *Reforzamiento de suelos con fibras artificiales, Trabajo de grado ingeniera civil de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín*, 2013.
- [14] *Cimientos Ltda., Estudio de Suelos Cafetería Facultad de Minas, Medellín: 2012.*

- [15] D. Neary, K. C. Ryan y L. F. DeBano, “Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water”, vol. vol. 4. , n.º Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42- Ogden, UT: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain, 2005 (revised 2008).
- [16] ASTM International, ASTM D 2216. Standard Test Methods For Laboratory Determination Of Water (Moisture) Content Of Soil And Rock By Mass, West Conshohocken, PA, 2005.
- [17] ASTM International, ASTM D 854. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer, West Conshohocken, PA, 2010.
- [18] ASTM International, ASTM D 4318. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, West Conshohocken, PA, 2013.
- [19] ASTM International, ASTM D 422-63 Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, West Conshohocken, PA, 2007.
- [20] ASTM International, ASTM C 117-13. Standard Test Method for Materials Finer than 75- μm (N.º 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing, West Conshohocken, PA, 2013.
- [21] J. Nogami y D. Villibor, Pavimentacao de baixo custo com solos lateríticos., Sao Paulo, Brasil: Ed. Vilibor, pp. 213, 1995.
- [22] ASTM International, ASTM D4972-13. Standard Test Method for pH of Soils, West Conshohocken, PA, 2013.
- [23] M. Lima, “Degradación físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas”. Tese de Doutorado, Brasília, DF: Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental. 2003.
- [24] J. &. B. G. M. I. García Galvis, “Evaluación de parámetros de calidad para la determinación de carbono orgánico en suelos”, *Revista Colombiana de Química*, pp. 201-209, 2005.
- [25] ASTM Committee D-18, Special Procedures for Testing Soil and Rock for Engineering Purposes: Fifth Edition, 1970.
- [26] Y. Valencia González, Biomineralización aplicada a la mitigación de procesos erosivos superficiales en un suelo tropical de la ciudad de Medellín. Tesis Maestría en Ingeniería-Geotecnia, Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 2011.
- [27] Embrapa, Manual de métodos de análise de solo, Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997.
- [28] ASTM International, ASTM D4647/D4647M-13, Standard Test Methods for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test,, West Conshohocken, PA, 2013.
- [29] ASTM International, ASTM D-5298-10. Standard test method for measurement of soil potential (Suction) using filter paper, West Conshohocken, PA., 2010.
- [30] ABNT. NBR 14114. Solo – Solos argilosos dispersivos. Identificação e Classificação por meio do ensaio do furo de agulha (Pinhole Test), Rio de Janeiro, 1998.

- [31] J. Camapum de Carvalho, M. Martines Sales, N. Moreira de Souza y M. T. Da Silva Melo, *Processos Erosivos No Centro-Oeste Brasileiro*, FINATEC, pp. 464, 2006.
- [32] D. A. Sáenz Meneses, *Efecto de un incendio forestal sobre grupos funcionales bacterianos edáficos en una plantación de Eucaliptus cinerea (Suesca-Cundinamarca)*, Bogotá: Trabajo de Grado para optar por el título de microbiólogo industrial, Pontificia Universidad Javeriana, 2006.
- [33] C. F. Dorronsoro, "Introducción a la edafología lección 5. Propiedades fisicoquímicas", [En línea]. Available: <http://www.edafologia.net/introeda/tema05/ccc.htm>. [Último acceso: 2016].
- [34] C. C. Sánchez, "Mullita y su identificación en materiales cerámicos", *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 5, n.º 1, p. 92, 1966.
- [35] E. G. Rochow, *Química inorgánica descriptiva*, España: Editorial Reverté S. A., 1981.
- [36] E. Besoain., *Mineralogía de arcillas de suelos*: n.º 60, San José, Costa Rica: IICA serie de libros y material educativos, 1985.
- [37] C. Wieting, B. A. Ebel y K. Singha, "Quantifying the effects of wildfire on changes in soil properties by surface burning of soils from the Boulder Creek Critical Zone Observatory", *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 13, pp. 43-57, 2017.
- [38] Soil Survey Division Staff. Soil Conservation Service. U. S. Department of Agriculture, *Soil survey manual selected chemical properties Handbook 18*, 1993.
- [39] Ceddia, M. B., L. H. Cunha Dos Angos, E. Lima, R. A. y L. A. Da Silva, *Sistemas de colheita da cana-de-açúcar e alterações nas propriedades físicas de um solo Podzólico Amarelo no Estado do Espírito Santo*, Brasília: Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 34, n.º 8, pp. 1467-1473, ago. 1999.
- [40] D. S. Rheinheimer, *Modificações nos atributos químicos de solo sob campo nativo submetido à queima*, Santa Maria: *Ciência Rural*, v. 33, n.º 1, pp. 49-55, jan./fev. 2003.
- [41] ASTM International, *ASTM D-3080. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Condition*, West Conshohocken, 2004.