



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Efectos de las altas temperaturas producto de los incendios en los procesos erosivos superficiales de un suelo residual

Daniel Ortega Ramírez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de ingeniería
Maestría en Ingeniería en Ingeniería – Geotecnia
Medellín, Colombia
2017

Efectos de las altas temperaturas producto de los incendios en los procesos erosivos superficiales de un suelo residual

Daniel Ortega Ramírez

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Magister en Ingeniería - Geotecnia

Director (a):

DSc. Yamile Valencia González

Codirector (a):

MSc Óscar Echeverri Ramírez

Línea de Investigación:

Mecánica de Suelos

Grupo de Investigación:

Geotecnia

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Área curricular Ingeniería Civil
Medellín, Colombia

2017

Dedicatoria

Solamente aquel que construye el futuro tiene derecho a juzgar el pasado.

Friedrich Nietzsche

Agradecimientos

Este espacio lo dedico, particularmente, a quienes han sabido tenerme paciencia durante este largo proceso para la culminación de mi maestría.

Primero que todo, quiero agradecer a mi directora, la docente Yamile Valencia González, pues de no ser por su orientación y paciencia durante la construcción de esta tesis, el documento que leerán a continuación nunca hubiera tenido un Norte.

Al profesor Oscar Echeverri Ramírez, por acompañar este proceso y brindar siempre esos comentarios y recomendaciones que terminaron enriqueciendo el documento.

Agradezco, especialmente, a mi familia, mi madre Claribeth Ramírez, mi novia Juliana Silva y en general a toda la familia Silva Bolívar, por toda la ayuda que me prestaron, sin ustedes esto no hubiera sido posible. Particularmente, agradezco a Gabriel Silva, quien fue mi colaborador para la toma de muestras y quien gracias a sus conocimientos en campismo permitió desarrollar el incendio controlado reduciendo los riesgos.

A Juliana Patiño Restrepo, compañera y monitora del laboratorio por la colaboración y toda la ayuda que me brindo, en la realización de ensayos y en las asesorías para la elaboración de otros. Igualmente, extendo los agradecimientos al docente David Guillermo Zapata y a todo el personal del Laboratorio de Geotecnia y Pavimentos de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

También, al docente Orlando Ruiz y al laboratorio de suelos de la Escuela de Geociencias de la Universidad Nacional Sede Medellín, por la ayuda prestada para la elaboración de los ensayos químicos para caracterización del suelo.

Al doctor Renato Cabral Guimaraes, gerente de división de tecnología e ingeniería civil de la empresa Furnas Brasil, quien sin conocerme se tomó el trabajo de ayudarme para la elaboración de los ensayos DRX.

Al docente Hugo Armando Estupiñan Duran y al laboratorio de Microscopía Avanzada de la Universidad Nacional sede Medellín, quienes me ayudaron para la elaboración de las pruebas en el Microscopía Electrónica de Barrido

Por último, quiero agradecer al personal de Solingral.S.A. Quienes me ayudaron en la elaboración de ensayos y a mis compañeros de INTEGRAL.S.A. Por las recomendaciones y el apoyo.

Resumen

En las últimas décadas, se ha visto incrementada la intervención antrópica en los diferentes ecosistemas debido al aumento desmedido de los grandes centros urbanos y sus necesidades de consumo, impulsadas por la creciente población. Estos incrementos implican que sea necesaria la adecuación de espacios para la producción y la vivienda. Típicamente, la adecuación de espacios para zonas de pastoreo, siembra o construcción en nuestro país, se realiza mediante quemas controladas, tanto de flora silvestre como de cultivos preexistentes.

Otro fenómeno, que también está relacionado con la intervención antrópica, son los incendios forestales, los cuales se incrementan en las temporadas cálidas en todo el país (IDEAM, 2011).

Tanto las quemas controladas, como los incendios forestales, generan cambios importantes (cambios químicos, físicos y mecánicos) en los suelos, los cuales en este estudio en particular demostraron ser perjudiciales, pues generaron aumento de la erodabilidad de los suelos residuales evaluados.

El estudio presentado a continuación, fue desarrollado sobre dos muestras de suelo residual, una inalterada y otra alterada mediante un incendio controlado, durante el cual fue posible realizar levantamientos de datos de transferencia de calor al suelo y la posterior recuperación de las muestras. El experimento emuló las condiciones de temperatura y tiempo a las que se ve expuesto un suelo durante un incendio forestal.

Las muestras recuperadas fueron sometidas a una campaña de ensayos del laboratorio, los cuales incluían pruebas de caracterización física, química, mineralogía, estructural e hidro/mecánicas.

De la batería de ensayos ejecutados se pudo concluir, que la exposición del suelo residual a altas temperaturas no solo causó una mayor erodabilidad sino, que, también causa cambios en la plasticidad, humedad, agregación de las partículas, la estructura, los parámetros de resistencia del suelo y una reducción en la succión matricial debido al agrietamiento.

En conclusión, se podría proyectar que la exposición a incendios de suelos residuales con características similares a los estudiados, ocasiona cambios significativos, que suelen ser desfavorables, tornando los suelos en susceptibles a agentes erosivos. Lo que da pie a posteriores investigaciones que relacionen los desprendimientos y desgarres que se producen en zonas previamente quemadas con otros parámetros como la pendiente o la tasa de precipitación.

Finalmente, estas investigaciones apuntan a la generación de herramientas académicas que le permitan a la sociedad y a las autoridades, cuestionarse sobre las consecuencias de los incendios forestales y las quemas controladas; las cuales pueden ayudar en algún momento a establecer normativas acordes a los riesgos identificados.

Palabras clave: Suelos residuales, erodabilidad, caracterización geotécnica de suelos, incendios, agregación, succión, agrietamiento.

Abstract

In the last decades, the anthropic intervention in the different ecosystems has been increased due to the disproportionate increase of the large urban centers and their consumption needs, driven by the growing population. These increases imply that the adaptation of spaces for production and housing is necessary. Typically, the adaptation of spaces for grazing, sowing or construction areas in our country is done through controlled burning of both wild flora and pre-existing crops.

Another phenomenon, which is also related to anthropic intervention, is forest fires, which increase in warm seasons throughout the country (IDEAM, 2011).

Both controlled burning and forest fires generate important changes (chemical, physical and mechanical changes) in the soils, which in this particular study proved to be harmful, since they generated an increase in the erodability of the residual soils evaluated.

The study presented below, was developed on two samples of residual soil, one unaltered and another altered by a controlled fire, during which it was possible to take data of heat transfer to the soil and subsequent recovery of samples. The experiment emulated the conditions of temperature and time to which a soil is exposed during a forest fire.

The recovered samples were subjected to a laboratory test campaign, which included physical, chemical, mineralogical, structural and hydro / mechanical characterization tests.

From the battery of tests carried out it was possible to conclude that the exposure of the residual soil at high temperatures not only caused a greater erodability but, also, causes changes in the plasticity, humidity, aggregation of the particles, the structure, the resistance parameters of soil and a reduction in matrix suction due to cracking.

In conclusion, it could be projected that the exposure to fires of residual soils with characteristics similar to those studied, causes significant changes, which are usually unfavorable, making the soil susceptible to erosive agents. that gives rise to further research that relate the detachments and tears that occur in previously burned areas with other parameters such as slope or precipitation rate.

Finally, these investigations show academic tools that allow society and authorities to question of consequences of forest fires and controlled burning; which can help to establish regulations according to the identified risks.

Keywords: Residual Soils, Erodability, Geotechnical characterization of soils, fires, aggregation, suction, cracking.

Pág.

Contenido

	Pág.
Agradecimientos	IV
Resumen	V
Contenido	VII
Lista de figuras	IX
Lista de fotografías	XI
Lista de tablas	XII
Lista de Símbolos y abreviaturas	XIII
Introducción	14
1.1 Objetivos generales	15
1.2 Objetivos específicos	15
2. Antecedentes y revisión bibliográfica	16
3. Zona de estudio	26
3.1 Generalidades de las zonas de estudio	26
3.2 Generalidades de la zona de estudio	28
3.3 Marco geológico de la zona de estudio	30
3.3.1 Contextualización geológica regional	30
4. Metodología	34
4.1 Metodología para simulación de incendio	34
4.2 Metodología para recolección de muestras.....	41
4.3 Ensayos de laboratorio	42
4.3.1 Caracterización física	42
4.3.2 Caracterización mineralógica y estructural	44
4.3.3 Caracterización química	46
4.3.4 Caracterización mecánica	47
5. Resultados y análisis	52
5.1 Simulación del incendio	52
5.2 Resultados del laboratorio	57

5.2.1	Caracterización física	57
5.2.2	Contenido de humedad natural	58
5.2.3	Límites de consistencia (clasificación según USCS).....	58
5.2.4	Análisis granulométrico	60
5.2.5	Clasificación USCS	63
5.2.6	Clasificación MCT	63
5.2.7	Contracción MCT	63
5.2.8	Relación de Vacíos.....	64
5.3	Caracterización mineralógica y estructural.....	64
5.3.1	Difracción de Rayos X	64
5.3.2	Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	66
5.4	Caracterización química.....	69
5.5	Caracterización mecánica.....	71
5.5.1	Curva característica de succión.....	71
5.5.2	Corte directo Consolidado Drenado (CD)	73
5.5.3	Análisis de estabilidad	74
5.5.4	<i>Pinhole test</i>	80
5.5.5	Desagregación	81
5.5.6	Inderbitzen	82
6.	Conclusiones y Recomendaciones	84
1.1	Recomendaciones y limitaciones	87
	Referencias bibliográficas.....	88
	Anexo: Ensayos del laboratorio.....	95

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2.1 Los regímenes de incendios definidos por los patrones de fuego según los tipos de bosques. (Neil.H ,1989)	17
Figura 2.2 Medidas de temperatura a dos cm de la superficie (Celeste,2017)	20
Figura 2.3 A. Gotas de agua sobre suelo hidrófugo, figura extraída de USDA, 2005 B. figura extraída <i>Water repellent soils a state of the art</i> , DeBano 1981.....	21
Figura 2.4 Formación de repelencia al agua inducida por el fuego (USDA, 2005).....	22
Figura 2.5 A secuencia de fenómenos de falla en taludes con suelos con capas con repelencia. B Erosión de un claro y quemado de pinos plantado en tierras agrícolas degradadas, Montañas Apalaches del Sur, Georgia. (USDA, 2005).	23
Figura 3.1 Localización del Municipio de Bello en Colombia (Tomado Google earth 28/10/2016).....	26
Figura 3.2 Localización del Municipio de Bello en Antioquia.	27
Figura 3.3 Localización del Municipio de Bello en Área Metropolitana	27
Figura 3.4 Localización del sitio para incendio controlado (Tomado Google Maps 28/10/2016).....	29
Figura 3.5 Localización de sitio para incendio controlado. Fuente MAp Gis Alcaldía de Medellín	29
Figura 3.6 Mapa Geológico regional de la zona de estudio. Tomado y modificado de Consorcio Microzonificación Sísmica (2006), se presenta en un círculo magenta muestra el sitio de análsis.	33
Figura 4.1 Predio donde se Realiza la prueba. Fuente MAp Gis alcaldía de Medellín...	35
Figura 4.2 Excavación y toma de muestra suelo natural (sección lateral)	37
Figura 4.3 Ampliación de excavación y toma de muestra suelo quemado(Seccion lateral)	39
Figura 4.4 Esquema de distribución de sitios para lectura de temperatura.....	40
Figura 4.5 Esquema básico de fogata india en estrella (Salazar, 2015)	41
Figura 4.6: Montaje del ensayo de succión por el método del papel filtro (extraído de Efecto de los lixiviados de residuos sólidos en las propiedades geotécnicas de un suelo tropical, Quintero 2016).....	48
Figura 4.7 A. Máquina para ensayo Inderbitzen (Ferreira, 2015), B Esquema de maquinaria para ensayo inderbitzen (Silva , 20)16.....	50
Figura 5.1: Carta de plasticidad con resultados obtenidos.	58
Figura 5.2: Curva de fluidez de las muestras con humedad natural.	59

Figura 5.3: Límites de consistencia de las muestras analizadas comparadas con la humedad natural.	60
Figura 5.4: Curvas granulométricas tamizado e hidrómetro (en agua y en defloculante)	61
Figura 5.5: Curvas granulométricas tamizado e hidrómetro (En defloculante)	62
Figura 5.6: Curvas granulométricas tamizado e hidrómetro (En agua)	62
Figura 5.7: Difractograma de la muestra Natural	65
Figura 5.8: Difractograma de la muestra Quemada.....	65
Figura 5.9: Curvas características de las muestras analizadas (Succión vs humedad). ..	71
Figura 5.10: Curvas características de las muestras analizadas (Succión vs humedad). ..	72
Figura 5.11: Variación de la relación de macroporos y microporos respecto a la relación de vacíos.	72
Figura 5.12: Esfuerzo axial vs esfuerzo cortante de las muestras estudiadas.	73
Figura 5.13: Análisis de estabilidad en condiciones estáticas del talud con los parámetros del suelo natural.	75
Figura 5.14: Análisis de estabilidad en condiciones estáticas del talud con los parámetros del suelo quemado.	76
Figura 5.15: Análisis de estabilidad en condiciones estáticas del talud con los parámetros del suelo quemado e incluyendo grietas por desecación.....	77
Figura 5.16: Análisis de estabilidad en condiciones seudoestáticas del talud con los parámetros del suelo natural.	78
Figura 5.17: Análisis de estabilidad en condiciones seudoestáticas del talud con los parámetros del suelo quemado.	79
Figura 5.18: Análisis de estabilidad en condiciones seudoestáticas del talud con los parámetros del suelo quemado y grietas.....	79
Figura 5.19: Resultados de los ensayos Pinhole para ambas muestras.....	80
Figura 5.20 Material para ensayo de erodabilidad ensayo Inderbitzen.	83

Lista de fotografías

	Pág.
Fotografía 4.1 Suelos residuales de granodiorita, típicos del batolito antioqueño.....	35
Fotografía 4.2 Zona cercana al sitio donde se realizara el ensayo y posterior muestreo	36
Fotografía 4.3 Apique realizado para la toma de la muestra patrón.	37
Fotografía 4.4 Perfil estratigráfico identificado.....	38
Fotografía 4.5: Microscopio Electrónico de la Universidad Nacional – Sede Medellín, laboratorio de Materiales.....	46
Fotografía 4.6: Preparación de las muestras al recubrirlas con oro para el ensayo de microscopía electrónica de barrido.....	46
Fotografía 4.7 Aparato para ensayo Inderbitzen, fabricación propia.....	50
Fotografía 5.1 Temperaturas tomadas en superficie (1250 C°) y a 2,0 cm de profundidad (733 C°).....	53
Fotografía 5.2 Las dos fotografías de la izquierda son tomadas al finalizar la prueba, las dos fotografías siguientes son lecturas, pasados 10 minutos de la finalización.	54
Fotografía 5.3 Finalización de la prueba realizada.	54

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1 Umbrales de temperatura para varias características físicas del suelo (USDA, 2005).....	18
Tabla 2-2 Importancia de los diferentes mecanismos de transferencia de calor en la en los diferentes componentes del ecosistema. (USDA, 2005.)	19
Tabla 4-1 Estimación de la constante c' a partir de c_t	43
Tabla 4-2: Grupos de clasificación MCT rápida. Modificado de (Nogami & Cozzolino, 1985))	44
Tabla 4-3: Ensayos realizados dentro de la caracterización química.	47
Tabla 5-1 Registros de Lecturas de temperaturas obtenidas en el experimento (Lectura a 20 minutos)	55
Tabla 5-2 Registros de Lecturas de temperaturas obtenidas en el experimento (Lectura a 30 minutos)	55
Tabla 5-3 Registros de Lecturas de temperaturas obtenidas en el experimento (Lectura a 40 minutos)	55
Tabla 5-4 Registros de Lecturas de temperaturas obtenidas en el experimento (Lectura a 50 minutos)	56
Tabla 5-5 Registros de Lecturas de temperaturas obtenidas en el experimento (Lectura a 60 minutos)	56
Tabla 5-6: Propiedades físicas de las muestras analizadas (Valores promedio).	57
Tabla 5-7 Resultados clasificación MCT	63
Tabla 5-8 Imágenes de la muestra Natural y sometida a incendios a diferentes niveles de aumento.	67
Tabla 5-9: Composición química de las muestras analizadas.	69
Tabla 5-10: Parámetros de resistencia al corte	73
Tabla 5-11: Factores de estabilidad obtenidos para suelos naturales y quemados.	74
Tabla 5-12: Factores de estabilidad obtenidos para suelos naturales y quemados condición pseudo estática.	77
Tabla 5-13 Fotografías ensayo de desagregación	81

Lista de Símbolos y abreviaturas

<i>Símbolo/Abreviatura</i>	<i>Término</i>
C.I.C.E	Capacidad de intercambio catiónico efectivo
c'	Constante para clasificación M.C.T.
c_t	Contracción de las pastillas de la clasificación M.C.T.
E	Relación de vacíos
E	Erosión del suelo
γ_h	Peso unitario húmedo
Gs	Gravedad específica de los sólidos
IP	Índice de plasticidad
LA	Arena con poca arcilla laterítica.
LA'	Arenas arcillosas lateríticas.
LG'	Arcillas lateríticas y arcillas lateríticas arenosas.
LL	Límite líquido
LP	Límite plástico
M.C.T.	Miniatura compactada tropical
N	Índice de porosidad
NA	Arenas limosas con limos cuarzosos y limos arcillosos no lateríticos.
NA'	Arenas limosas y arenas arcillosas no lateríticas.
NG'	Arcillas, arcillas limosas y arcillas arenosas no lateríticas.
NS'	Limos caoliníticos y micáceos, limos arenosos y limos arcillosos no lateríticos.
MEB	Microscopía electrónica de barrido
UCSC	Clasificación unificada de suelos
W	Humedad
\emptyset	Angulo de fricción del suelo
C	Cohesion del suelo

Introducción

Desde que el hombre identificó la necesidad de establecerse en un sitio para el desarrollo de su vida en sociedad, se ha requerido de la adecuación de espacios, los cuales en muchas ocasiones eran ocupados por fauna y flora nativa. Esta tarea de adecuación se vio facilitada gracias al uso del fuego, pues la quema reduce en gran medida la necesidad de emplear herramientas como hachas y machetes. En la actualidad, estas quemaduras se realizan tanto en vegetación nativa como en zonas de siembra, pastoreo o construcción, y pueden ser tanto controladas como accidentales.

En el ámbito nacional, las quemaduras o incendios, también pueden producirse de forma natural, debido a tormentas eléctricas y otros fenómenos. Pero, tal como lo indica el IDEAM en la información emitida sobre incendios forestales, gran parte de estos son causados por la intervención del hombre (IDEAM, 2011), y suelen presentarse con mayor frecuencia en zonas aledañas a pueblos, pequeñas ciudades, espacios recreativos al aire libre, sitios de campamentos, zonas de pastoreo y siembra. Las causas de estos incendios varían entre la mala disposición de residuos, fogones y fogatas mal dispuestas o en algunos casos mal apagadas y la quema voluntaria para la adecuación de campos. El ministerio de Medio Ambiente, señala que el 95% de los incendios forestales son de origen antrópico. (Minambiente et al., 2000), sin embargo, independiente de su origen o finalidad, la realización de dicha práctica, produce cambios significativos sobre el aspecto físico, las características mecánicas e hidráulicas de los suelos que se ven expuestos a estos fuertes cambios de temperatura. (Departamento de agricultura de los E.U., 2005.)

Durante los incendios, los horizontes superficiales de suelo se ven sometidos a fuertes incrementos en las temperaturas, procesos que causan cambios en la estructura química, las características físicas, mecánicas, en algunos casos cambios mineralógicos e hidráulicos de los suelos. Algunos de los cambios más significativos son las variaciones en la mineralogía, la relación de vacíos, la porosidad y la textura (Patiño et al., 2014). Otro fenómeno, que se presenta, es el aumento del potencial erosivo en los suelos, debido a la pérdida de los arbustos, plantas y materia orgánica (Wright, 1982).

Estos fenómenos erosivos y cambios en las características de los suelos posteriores a los incendios, se han tornado en problemas para la comunidad, tal como lo afirman entidades gubernamentales de Estados Unidos (Departamento de agricultura de los E.U., 2005.)

Durante la obtención de información de incendios, fue posible concluir que existen muchos estudios que muestran las ventajas y desventajas de las quemaduras e incendios, sobre los suelos. Pero, dichos estudios, se enfocan principalmente en la caracterización de los horizontes de suelos orgánicos, dejando de lado los estudios sobre suelos de

origen residual los cuales son típicos de nuestra región. La definición de suelo residual para este documento hace referencia al material proveniente de proceso de meteorización de la roca in situ y que no ha sido transportado de su lugar de origen (Blight, 1997).

Buscando indagar si existen cambios en el comportamiento que sufren los suelos residuales sometidos a altas temperaturas, se realizaron un grupo de pruebas del laboratorio, intentando caracterizar efectos en la erodabilidad, pues es probable que dichos suelos cambien tal como sucedió para los flujos de lodos evaluadas en por Patiño en el 2014.

La investigación, que es presentada a continuación, ha empleado simulaciones de incendios en campo, recolección de muestras tanto inalteradas como alteradas. Muestras a las que se les realizó una batería de ensayos de laboratorio típicos, como son la determinación de los límites de Atterberg, determinación de la humedad natural, ensayos de corte directo, gravedad específica, etc, y otras pruebas que no son tan comunes en nuestro país, como: la determinación de las curvas de retención de agua, la clasificación MCT rápida, el ensayo de *Pinhole test e Inderbitzen*. Pruebas que arrojan información valiosa y que deberían aplicarse con mayor frecuencia en nuestro medio.

Los ensayos efectuados pretenden caracterizar algunas propiedades físicas, químicas e hidromecánicas del suelo, permitiendo identificar de manera indirecta la susceptibilidad a la erodabilidad del suelo y las posibles causas del mismo. Es importante mencionarle al lector, que en este documento no solo encontrara interpretaciones relacionadas con la erodabilidad, sino que también se analizan algunos resultados relacionados con el cambio de otras propiedades del suelo.

1.1 Objetivos generales

- Determinar el efecto de las altas temperaturas sobre los parámetros geotécnicos relacionados con la erosión superficial de un suelo residual, de la región Antioqueña.

1.2 Objetivos específicos

- Cuantificar mediante ensayos de laboratorio, el efecto de las altas temperaturas, en las propiedades geotécnicas que controlan la erosión superficial de un suelo residual.
- Validar una metodología que permita definir la variación de parámetros geotécnicos relacionados con la erosión superficial mediante la interpretación de los resultados obtenidos en pruebas del laboratorio a muestras sometidas al efecto de las altas temperaturas.

2. Antecedentes y revisión bibliográfica

En la mayoría de los ecosistemas, el fuego está presente naturalmente, ajustando su estructura y permitiendo mantener su diversidad y estabilidad (Wright ,1982). Particularmente, en Colombia, los incendios, son temas que han ganado relevancia, pues las temporadas cálidas que se presentan a lo largo del año (y que se han intensificado en los últimos años) han aumentado la probabilidad de ocurrencia de este tipo de fenómenos.

Por lo general, los estudios relacionados con el tema, tienen un fuerte componente de las afectaciones a las coberturas vegetales y suelos orgánicos (Solera, 1999 o Rosero, 2013).

Estos fenómenos de incendios son abordados con mayor frecuencia en la agronomía y típicamente estudian: las áreas sometidas a los incendios forestales, el tipo de vegetación afectada y la influencia de esta práctica en el suelo para actividades de cultivo, pero no se han profundizado, en la influencia de estos fenómenos sobre las propiedades geotécnicas de las capas del suelo subsuperficial.

Con el fin de brindar un acercamiento inicial al problema de los incendios, es necesario definir la terminología empleada. Es por esto, que se acude inicialmente al boletín BOE (Boletín Informativo del Estado del gobierno de España) en su ley 43 del 2003, artículo 6, donde se describe que los incendios forestales corresponden a “fuego que se extiende sin control sobre combustibles forestales en el monte”- (Ley N°43,2003). El concepto “monte” según la definición suscrita en la misma ley (artículo 5) corresponde a: “todo terreno en el que vegetan especies forestales arbóreas, arbustivas, de matorral o herbáceas, sean naturales o procedan de siembra o plantación” (Ley N°43,2003). Definiciones de las que se extrae, que un incendio forestal corresponde al fuego que se extiende sin control sobre plantas que procedan tanto de siembra como de plantación, los cuales funcionan como combustible.

Es importante entonces conocer la mecánica del fuego para entender cómo se propaga y cómo afecta los diferentes elementos que se ven expuestos.

El fuego, tal como se describe en la literatura (Blanco, 2008), es un proceso químico, causado por la combustión. Dicho proceso produce energía, dióxido de carbono, vapor de agua y residuos. El fuego requiere entonces de tres elementos, Calor, oxígeno y combustible. Elementos que suelen estar presentes en mayor o menor medida en casi todos los ambientes a los que estamos expuestos (Blanco, 2008).

Existen zonas más propensas a los incendios, pues exhiben mayor frecuencias de ocurrencia (ver Figura 2.1). Pues en el caso de ambientes muy cálidos, pero sin combustible o ambientes más húmedos o fríos pero con mucho combustible, suelen

presentar frecuencias más bajas, que otros que presenten condiciones climáticas menos extremas y una oferta de combustibles adecuadas (Neil.H ,1989).

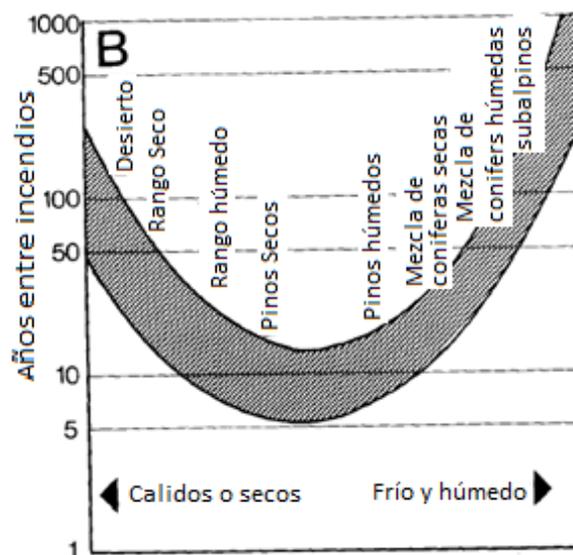


Figura 2.1 Los regímenes de incendios definidos por los patrones de fuego según los tipos de bosques. (Neil.H ,1989)

Según la Figura 2.1, que muestra cada cuantos años sucede en promedio un incendio en diferentes tipos de bosque, es posible concluir que este fenómeno tiene frecuencias mas altas en bosques de pinos, mientras que ambientes muy cálidos como el desértico no tiene frecuencias tan altas, lo que se debe a la falta de material combustible.

En Colombia, los incendios son un tema que ha ganado relevancia y por eso muchos de los estudios relacionados son realizados por el IDEAM y las corporaciones autónomas regionales. Estos estudios, suelen estar asociados principalmente a los efectos, particularmente a las coberturas vegetales afectadas, (IDEAM, 2011). Pero no se ha avanzado en la influencia de estos fenómenos sobre nuestros suelos.

En otras regiones del planeta, ya se han realizado avances significativos sobre los efectos de los incrementos en las temperaturas y los producidos por incendios en sus respectivos suelos, demostrando que existen variaciones en las características de los suelos. Algunas de las características que pueden llegar a sufrir cambios significativos, en función del incremento de las temperaturas son: textura, contenido de arcilla, la estructura del suelo, densidad aparente, y la porosidad (cantidad y el tamaño) (DeBano, 1981).

Estos cambios en las características de los suelos, suelen estar íntimamente relacionados con los rangos de temperaturas a las que se exponen, pues materiales como: las arcillas, comienzan a sufrir cambios en su estructura a partir de los 460°C, mientras que las arenas requieren más de 1000°C para modificar su estructura, (USDA, 2005).

Se ha observado, en zonas afectadas por el fuego, que se presenta un aumento del porcentaje de partículas gruesas tales como arenas y gravas (F. Díaz-Fierros, 1982) (R. C. Graham y A. L. Ulery, 1993) y por tanto, disminuciones en los contenidos de partículas finas como arcilla y limo. Adicionalmente, el fuego puede causar modificaciones en la tasa de infiltración (K. Mertens, 2015) y evaporación del agua, en la porosidad y en el grado de susceptibilidad de los suelos a la erosión hídrica y eólica (E.A. Cassol, 2004).

Es importante mencionar que en otras latitudes se demostró que las primeras lluvias de carácter torrencial y el impacto de las gotas de agua sobre el suelo desnudo, contribuirá a destruir los agregados (D. C. Moore y M. J. Singer, 1990). Las fracciones más finas taponaran los poros reduciendo la velocidad de infiltración, aumentando la escorrentía (S. D. Ela, 1992) favoreciendo la erosión superficial y contribuyendo al desencadenamiento de movimientos en masa (V. Andreu, 1994).

Otro de los atributos, que usualmente se ve modificado, corresponde a los componentes químicos que existen, pues algunos autores indican que inmediatamente después del proceso de ignición, se presentan aumentos en los contenidos de N, P, K, Ca, y Mg mineralizados, con una consecuente elevación del pH (R.V. Soares ,1995), (M. Redin, 2001). Lo que también se identifica en la ceniza que tiene alta concentración de algunos nutrientes con estos elementos (M. Redin, 2001).

Una última modificación consiste en el cambio materia orgánica (R.V. Soares ,1995). Cuando esta decrece genera una pérdida de los complejos arcillo-húmicos, vitales para la resistencia del suelo a la erosión y al transporte (J. M. Solera,1999).

En la Tabla 2-1 se presentan los umbrales de temperatura a los que suelen presentarse los diferentes cambios en el suelo.

Tabla 2-1 Umbrales de temperatura para varias características físicas del suelo (USDA, 2005)

Características del suelo	Umbral de temperatura		Fuente
	F	°C	
Humedad del suelo	482	250	DeBano and Krammes, 1966
Estructura del suelo	572	300	DeBano, 1990
Formación de Calcita	572-932	300-500	Iglesias and others, 1997
Contenido de Arcillas	860-1796	460-980	DeBano, 1990
Contenido de Arenas y cuarzo	2577	1414	Lide, 2001

Se identificó que los incrementos en las temperaturas medidos en los suelos durante los incendios son dados por transferencia de calor mediante diferentes procesos (USDA, 2005), los cuales se describen a continuación:

- Radiación: Transferencia de calor cuando dos cuerpos no se encuentran en contacto directo.
- Conducción: Transferencia de calor entre dos cuerpos que están en contacto directo.
- Convección: Transferencia de calor de un punto a otro por la mezcla de una porción de fluido con otro.
- Transferencias de masa y vaporización: Proceso de adición de calor al agua hasta que cambie de fase
- Condensación de agua: Cambio de estado de un gas a un líquido

Estos procesos suelen transmitir calor en mayor o menor medida, según sus características tal como se muestra en la Tabla 2-2

Tabla 2-2 Importancia de los diferentes mecanismos de transferencia de calor en la en los diferentes componentes del ecosistema. (USDA, 2005.)

Mecanismo de Transferencia de Calor	Componente del Ecosistema	Importancia de la transferencia de calor
Radiación	Aire	Medio
	Combustible	Alto
	Suelo	Bajo
Conducción	Aire	Medio
	Combustible	Bajo
	Suelo	Bajo (secado) Alto (humedecimiento)
Convección	Aire	Alto
	Combustible	Medio
	Suelo	Bajo
Transferencia de masa	Aire	Alto
	Combustible	Bajo
	Suelo	Bajo
Vaporización/condensación	Aire	Baja
	Combustible	Media
	Suelo	Alta

Ahora bien, es importante entender que usualmente la zona más afectada dependerá del tipo de vegetación, de las características del suelo y del tiempo de exposición. Ejemplos de esto, son los resultados obtenidos por la Universidad de California donde, para un bosque sometido a un incendio con material que se enciende a baja temperatura, el pico de calor del suelo se alcanzó entre los 30 minutos y los 45 minutos de haber iniciado el incendio (Agee, James K, 1973). Se logró en el primer horizonte de suelo, una temperatura aproximada de 250 °C, mientras que para un bosque de chaparral (bosque compuesto por especies leñosas de tamaño pequeño), con un incendio de media intensidad, el pico de temperatura se presentó entre los 20 y 40 minutos, y alcanzó 150° C en el horizonte superficial (DeBano, 1990).

Por lo general en superficie la tasa de propagación de un incendio está por debajo de los 0,3 metros/min, velocidad que aumenta a medida que se aleja el fuego del suelo y se aproxima más a las copas de los árboles (USDA, 2005). También, indican que típicamente la llama en superficie alcanza una altura que varía entre 0,1 m y 0,5 m, valor sumamente bajo al compararse con lo que sucede en las zonas medias de los árboles, donde la longitud de la llama varía en promedio de 3,0 a 10 m y las coronas de los árboles donde la altura de las llamas es superior a 5,0 m. Según esto, se espera que las llamas en el suelo lleguen hasta 0,5 m de alto.

Existen otros referentes que dan indicios de la forma en que deberá variar la temperatura en el suelo, los cuales indica, que las temperaturas de los incendios se dividen en dos grupos: Bajas temperaturas de quemado, donde el suelo en superficie registra una temperatura de 200 C° a 250 C°, mientras que el registro a 2 cm es mayor a 100C° y menor a 200C° y los incendios con altas temperaturas de quemado, donde en superficie se registran de 450 C° a 500 C°mínimo, mientras que a 2 cm se registran temperaturas mayores 200 C (Celeste, 2017).

Celeste presenta figuras en las que para los incendios de bajas temperaturas de quemado, el pico de temperatura se alcanza entre los 30 min y 40 min, mientras los incendios de altas temperaturas de quemado presentan el pico de temperatura entre 50 y 60 minutos(Celeste, 2017).

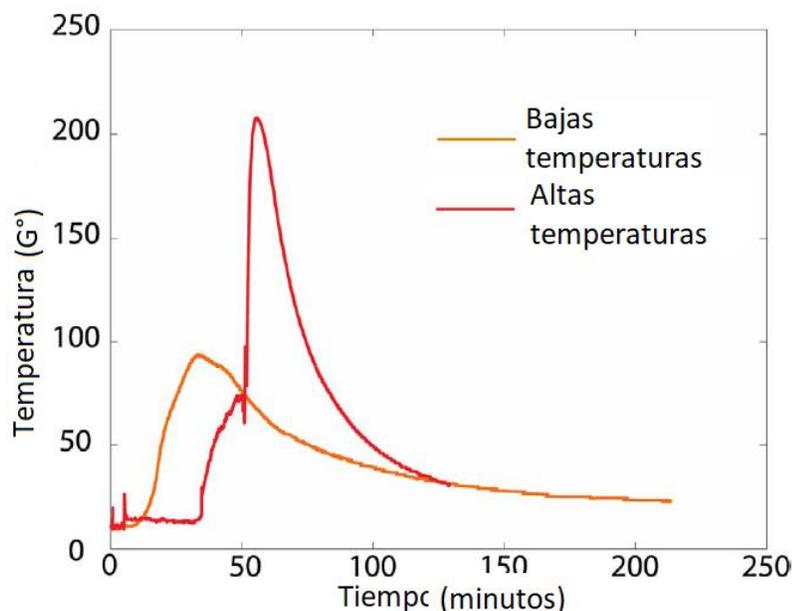


Figura 2.2 Medidas de temperatura a dos cm de la superficie (Celeste,2017)

Basado en estos datos referenciados y ya que la metodología propuesta para simulación del incendio implica la toma de muestra para un apique (anchos típico de 1,3 m a 1,5 m), se estima que el fuego en superficie (con una velocidad de 0,3m/min), emplearía cerca

de 5,0 minutos en cubrir el área de análisis y tendría una llama con una altura entre 0,1m y 0,5m.

Por otro lado, un factor importante en los cambios que sufren los suelos está relacionado con el agua y la manera en la que ésta se mueve en el suelo. Por tal razón la saturación, la humedad, la distribución y conexión de los poros, por los que viaja el agua, se convierten en variables importantes a la hora de determinar el comportamiento del suelo durante los incendios (DeBano, 2000), afirmaciones que deben ser validadas para suelos residuales tropicales.

Existe un fenómeno conocido como repelencia del suelo (fenómeno en el que el suelo en el que este se vuelve impermeable), el cual sumado a la pérdida de la cobertura vegetal, puede favorecer los aumentos en la erodabilidad de un talud, este fenómeno de repelencia se produce a partir de procesos tanto físicos como químicos (DeBano 1981.)
(Ver Figura 2.3)



Figura 2.3 A. Gotas de agua sobre suelo hidrófugo, figura extraída de USDA, 2005
B. figura extraída *Water repellent soils a state of the art*, DeBano 1981

El fenómeno de repelencia corresponde a capas de suelo hidrófobo o suelos que no permiten el paso de agua manteniéndola en su superficie (USDA, 2005) por diferentes factores:

- Secado irreversible de la materia orgánica.
- El revestimiento de partículas minerales del suelo con lixiviados de materiales orgánicos.
- El recubrimiento de partículas de suelo con subproductos microbianos hidrófobos
- El entremezclado de partículas de suelos secos y materia orgánica seca.

La repelencia no es muy conocida, pero en muchas ocasiones las capas de suelos hidrófugos pueden ser producidas por suelos orgánicos o por altos contenidos de raíces las cuales pueden llegar a quemarse durante los incendios(USDA, 2005), ver Figura 2.4. Este fenómeno, en muchas ocasiones es el causante de los pequeños desgarres en suelos después de incendios (DeBano,1977).

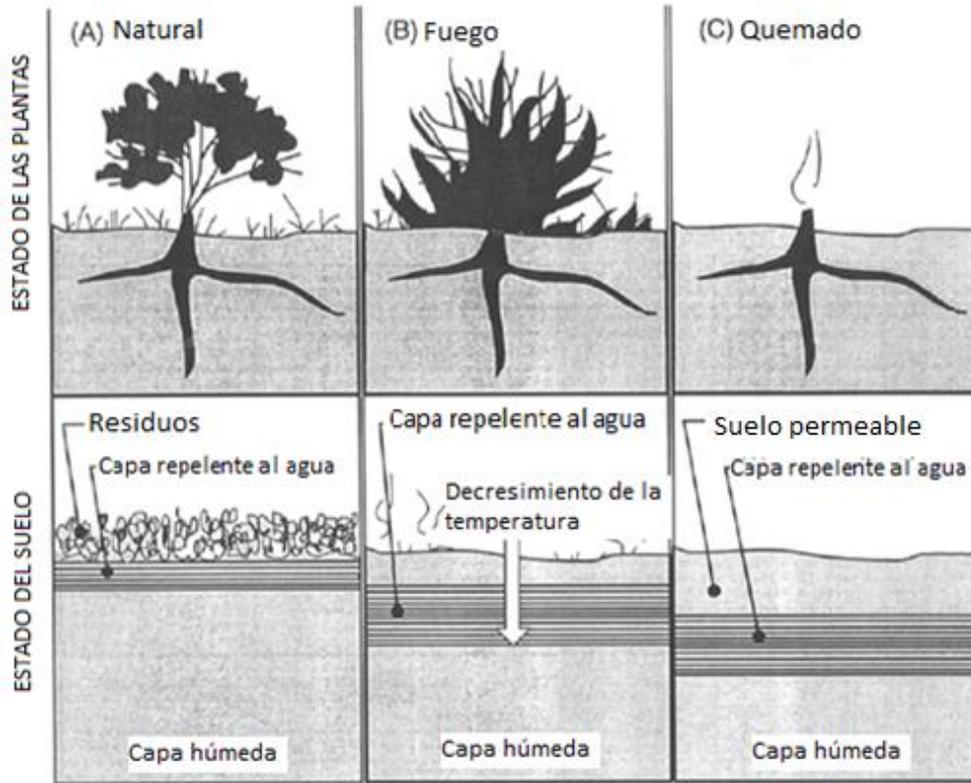


Figura 2.4 Formación de repelencia al agua inducida por el fuego (USDA, 2005)

Estas capas de suelos con repelencia producen desgarres superficiales y aumentan la escorrentía, y tal como lo citan algunos autores esto puede favorecer mayores desgarres o deslizamientos en terrenos que se localicen en la parte inferior de las zonas quemadas (USDA, 2005). Ver Figura 2.5.

Ya que en la región Andina es común encontrar terrenos montañosos y que se registran incendios regularmente, el riesgo de desgarres superficiales que desencadenen movimientos en masa de mayor tamaño es latente.

Debido a los riesgos que representa estos fenómenos de erodabilidad en nuestro ámbito local, se realizó una revisión de los métodos cualitativos para medir esta característica y se logró identificar la importancia de implementar algunas pruebas que se están realizando en países con condiciones similares a las nuestras y que típicamente no se implementan en nuestro medio.

Uno de estos ensayos propuesto para el estudio de la erodabilidad, corresponde al ensayo Inderbitzen, desarrollado en 1961 para evaluar la susceptibilidad a la erosión (Silva, 2016). Dicha prueba consiste en hacer correr agua, sobre una muestra de suelo colocada en medio del canal, midiendo la pérdida de material causada por el flujo de agua.

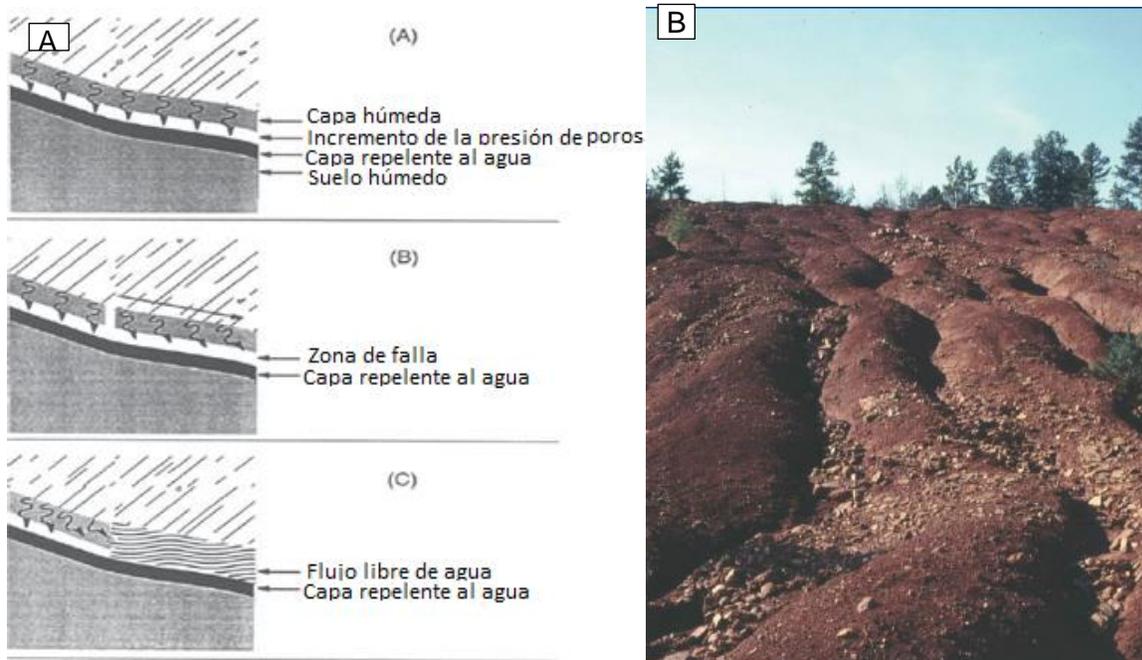


Figura 2.5 A secuencia de fenómenos de falla en taludes con suelos con capas con repelencia. B Erosión de un claro y quemado de pinos plantado en tierras agrícolas degradadas, Montañas Apalaches del Sur, Georgia. (USDA, 2005).

Particularmente, en este estudio se evaluó un suelo residual formado en el sitio por procesos de meteorización física y química y se desarrollan principalmente, en condiciones tropicales húmedas, de meteorización química intensa (Suárez, 1998). Es por eso que, dichos suelos suelen adoptar características particulares de resistencia, permeabilidad y composición.

Para la caracterización de los suelos residuales se emplea la metodología de Deere, la cual propone nombrar el suelo en función del grado de meteorización que exhibe. El autor propone que el suelo puede variar desde un horizonte IV (Zona de transición suelo roca, compuesta por mezcla de matriz de suelo y bloques rocosos), hasta VI (Suelo donde la estructura de la roca no se puede conocer, usualmente conformado por limos y arcillas) (Deere, 1971).

En lo concerniente al método para obtención de muestras en las que se pudiera medir efecto de los incendios, la literatura muestra dos caminos. El primero consiste en toma de muestras en zonas sometidas a incendios y posterior toma en zonas cercanas donde el investigador considere que las condiciones del suelo son similares a la zona donde se produjo el incendio. Dicho método presenta una limitante importante pues asumir que suelos cercanos son idénticos y más cuando los incendios pueden abarcar grandes áreas puede incurrir en errores. Varios ejemplos de esta metodología de muestreo se mencionan en USDA, 2005.

El segundo camino consiste en la simulación de incendios sobre muestras recuperadas, actividad para la que se han emplean diferentes métodos, entre los que se encuentra el uso de muflas como lo realiza Patiño, 2014 o el uso de pistolas de calor como la usada en Celeste, 2017. Pero durante la revisión bibliográfica no fue posible encontrar estudios donde se realizaran incendios en suelos residuales con la intención de estudiarlo.

Respecto la situación particular en Colombia, en relación a estudios sobre el efecto de incendios en los suelos residuales, no existen referentes con un gran número de investigaciones. Pues en las pesquisas recopiladas se identifica que se han realizado revisiones bibliográficas, caracterización sobre depósitos coluviales mediante mufla y no pruebas en campo.

También se identificó que los investigadores alrededor del mundo se han enfocado en el efecto del aumento de las temperaturas y no en la simulación de incendio. Ya que en este estudio se espera contar con datos más similares a los obtenidos en un incendio real, para lo cual se hace necesario desarrollar una metodología que cause afectos más similares a los obtenidos en campo luego de sucedidos estos eventos.

El primer grupo de resultados importantes obtenidos en el país, corresponde al desarrollado en un artículo emitido por el grupo de investigación de Geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. El cual presenta un primer acercamiento sobre la influencia de las altas temperaturas en un ambiente local. Pero en dicho caso se evaluó la respuesta sobre un suelo tropical superficial, que correspondería a un flujo de lodos y escombros derivados de la anfibolita de Medellín, materiales que varían sustancialmente de un suelo residual, pues dichos suelos perdieron en gran medida la posible estructura del material parental. (Patiño, 2014).

Otro aspecto que se debe mencionar del documento producido por el grupo de investigación es que se emplea para la simulación del incendio una mufla, la cual llevó el suelo a una temperatura de 1000°C, la elección de dicha temperatura se debió a la información suministrada por bomberos de Medellín quienes indicaron que durante un incendio forestal esta es la máxima temperatura a alcanzada.

La simulación del incendio que se realizó para este documento, demostró que aunque es posible alcanzar una temperatura de 1000°C en superficie, esta no corresponde a la alcanzada por el suelo en campo. Por lo que es más próximo a la realidad la quema controlada, como se describe en este documento.

En el estudio de Patiño (Patiño, 2014) se logró evidenciar que al someter el suelo a estas temperaturas, se modifica sustancialmente el tamaño de las partículas, pasando de tener limos (MH) a tamaños mayores como arenas (SP), aumentando la gravedad específica y presentando modificaciones en la relación de vacíos. Durante este estudio se demostró que el suelo sufre una acidificación, lo que implicaría una variación en la composición química. Un último aspecto importante, por mencionar en el estudio realizado por Patiño el 2014, son los resultados obtenidos durante las pruebas de succión, las cuales indicaron que el suelo natural presentaba una succión mayor a la del suelo después de someterse a la mufla, debido al aumento de los vacíos, ocurrida en el suelo sometido a las altas temperaturas.

Respecto al comportamiento químico del suelo, recopilaciones bibliográficas como las elaboradas por Rosero en el año 2013, indican que usualmente luego de un incendio el aumento del ph en el suelo se debe principalmente a la interacción del suelo con la ceniza debido al contenido de carbonato potásico. El cual proviene de un ácido débil y una base fuerte y que al hidrolizarse presenta una reacción básica. Otros autores indican que este fenómeno suele suceder luego de pasado un tiempo pues inicialmente el aporte de cationes fundamentales como Ca, Mg, K, Si y P reducen el Ph (Cambell,1994).

Un resultado importante identificado por algunos autores es el hecho de que el cambio en el ph es función de la combustión de la materia orgánica presente, si se combustiona gran cantidad de materia orgánica el ph aumenta como lo indica Ulery, 1993 o casos con registros insignificantes como reporta Giovannini,1989.

Respecto al contenido de materia orgánica luego de un incendio, la literatura afirma que éste podrá aumentar o disminuir en función de las temperaturas alcanzadas (Martinez,1991), típicamente para incendios de alta intensidad esta disminuye mientras que en los de baja intensidad aumenta . Giovannini, 1990.

3.Zona de estudio

3.1 Generalidades de las zonas de estudio

Debido a que en este estudio se realizara una simulación de incendios, fue necesaria la definición de una zona de estudio donde se identificaran suelos residuales y simultáneamente poca vegetación que redujera el riesgo de propagación del fuego. La zona seleccionada para la simulación del incendio, se encuentra ubicada en jurisdicción de Bello, municipio que pertenece al Valle de Aburrá. Uno de los valles de la Cordillera de los Andes. (Alcaldía de Bello, 2016).En la Figura 3.1 se presenta la localización del municipio en Colombia.



Figura 3.1 Localización del Municipio de Bello en Colombia (Tomado Google earth 28/10/2016)

La elección del municipio de Bello como sitio para la simulación del incendio, se debió a varios factores, uno de ellos fue la facilidad para el transporte de las muestras de cajón desde una zona rural al laboratorio de la universidad Nacional localizado en la ciudad de Medellín, espacio donde se realizaron los ensayos. (Ver Figura 3.2 y Figura 3.3)
Otro factor importante fue la realización de la prueba en un predio privado, donde se pudiera limpiar, asegurar la zona y simular el incendio, pues en muchos parques o zonas de reserva públicas encender fogatas se encuentran prohibidos debido al riesgo que conlleva.



Figura 3.2 Localización del Municipio de Bello en Antioquia.
(Tomado Google Maps 28/10/2016)



Figura 3.3 Localización del Municipio de Bello en Área Metropolitana
(Tomado Google Maps 28/10/2016)

Bello a 2016, contaba con 122,66 km² de suelo rural, con alturas que varían entre 1400 m.s.n.m. y los 2880 m.s.n.m., tal como se afirma en el anuario estadístico; presenta un índice promedio de precipitación de 1.347mm, y una temperatura promedio de 23°C. El clima varía entre periodos secos y lluviosos. La toma de muestras se realiza en la zona rural en límites entre la Comuna 5 y vereda La Primavera. (En la Figura 3.2 se puede identificar la localización del municipio respecto a la ciudad de Medellín y a Envigado)

Bello ha venido presentando un incremento paulatino de la población tal como lo indica el DANE, en el censo oficial del 2005, donde se observa que entre los años 1993 y 2005 la población ha aumentado cerca de un 83%, y se esperaba según la proyección de DANE que entre el 2005 y el 2020 la población aumentara un 30% más, lo que suele presentar una mayor cantidad de incendios.

3.2 Generalidades de la zona de estudio

Para la elaboración del presente estudio, inicialmente se realizaron varias actividades, las cuales incluyeron, la visita a sitios que fueron sometidos a incendios reales (Incendio Cerro El Volador día 3/8/2015) y simulación de un incendio controlado en una zona preestablecida, que reprodujera lo reportado por la literatura y lo observado en El Volador.

Es importante resaltar que según el periódico “El Espectador,” en su artículo emitido el mismo día del incendio en el cerro El Volador, el evento fue causado por “las altas temperaturas que se han presentado en los últimos meses” y el tiempo de respuesta de los bomberos en ese momento fue de 1,5 horas (El Espectador, 3/8/2015). En la zona se logró observar que las llamas no solamente viajaron por las ramas de los árboles, sino que se propagó a través del césped consumiendo gran parte de la vegetación del sitio, dejando una capa de ceniza en algunos puntos.

La zona que finalmente seleccionada para la simulación del incendio se eligió prestando especial cuidado en reducir, al mínimo, el riesgo de propagación del fuego y garantizando que el suelo sobre el que se desarrollaría la prueba correspondiera a un suelo residual de tonalita. (Ver Figura 3.6)

El sitio identificado para la simulación de incendio se ubicó en el municipio de Bello, en una zona rural en los límites entre la vereda Primavera y la zona urbana de la comuna 5 (ver Figura 3.4 y Figura 3.5), donde se identificó la presencia de suelos residuales de tonalita del Batolito de Ovejas, el cual es un cuerpo satélite del Batolito Antioqueño

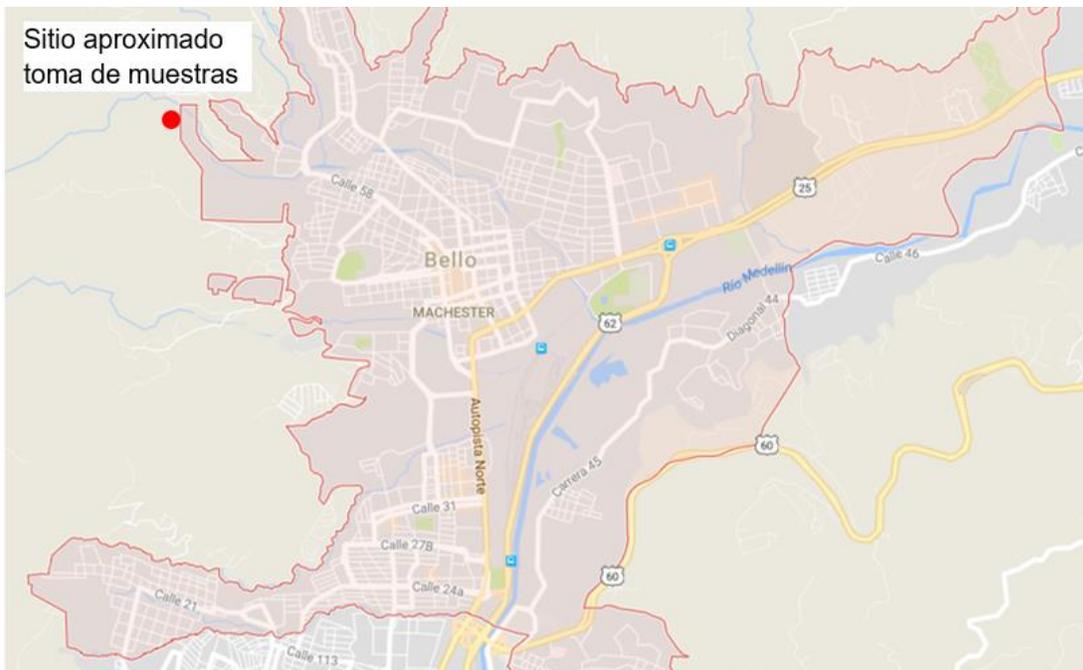


Figura 3.4 Localización del sitio para incendio controlado (Tomado Google Maps 28/10/2016)



Figura 3.5 Localización de sitio para incendio controlado. Fuente MAP Gis Alcaldía de Medellín

3.3 Marco geológico de la zona de estudio

El capítulo que se presenta a continuación tiene como fin exponer las características, geológicas del sector.

3.3.1 Contextualización geológica regional

La zona de estudio se encuentra ubicada en la ladera noroccidental del Valle de Aburrá, en jurisdicción del municipio de Bello. Geológicamente, la zona donde se tomó la muestra corresponde a perfiles de meteorización de rocas ígneas del denominado Stock de Ovejas de edad Cretácico (similar al Batolito Antioqueño), y en zonas cercanas se identificaron depósitos de flujos del tipo lodos y/o escombros, hacia las zonas bajas y depósitos aluviales presentes principalmente a lo largo de las quebradas La Poblada, La Pradera, Los Alcázares y Los Vanegas, las cuales conforman la cuenca principal ubicada hacia esta zona del municipio.

A continuación, se describen de manera general y en orden cronológico las unidades geológicas presentes en el área de estudio y sitios cercanos. La Figura 3.6 muestra la distribución de las unidades presentes en esta zona del Valle de Aburrá.

Periodo Triásico

Grupo El Retiro

Propuesto por Ingeominas (2005) como una unidad litodémica, bajo la cual están incluidas rocas de medio y alto grado de metamorfismo, correspondientes con la denominada Zona Ayurá del Complejo Polimetamórfico de la Cordillera Central (Restrepo y Toussaint, 1984 en Consorcio Microzonificación Sísmica, 2006).

- **Esquistos anfibólicos de Baldías (TReaB)**

Corresponden a unidades de rocas metamórficas en el sector del cerro Baldías. Estas rocas presentan un avanzado estado de meteorización, pero alcanzan a definirse esquistos anfibólicos, gneises y anfibolitas en paquetes intercalados con amplia variación textural cuya mineralogía implica un metamorfismo de medio a alto grado. Estas rocas aparecen instruidas por la tonalita del Batolito de Ovejas; donde se observa el cambio del saprolito de una roca tipo granitoide a una esquistosa (Correa y Martens 2000 en Consorcio Microzonificación Sísmica, 2006).

Periodo Jurásico

Complejo Ofiolítico de Aburrá

Unidad propuesta por Correa y Martens (2000) que comprende la denominada Dunita de Medellín y las Metabasitas del Picacho, donde se incluyen las anfibolitas y metagabros, los cuales se plantea, hacen parte de la misma ofiolita (Consortio Microzonificación Sísmica, 2006).

- **Dunitas de Medellín (JKuM)**

Conforman una faja en forma de cuña dispuesta NNW, ubicada al oriente del Valle de Aburrá, la cual se extiende desde el sector de Las Palmas hasta el municipio de San Pedro (Giraldo y Sánchez, 2004 en Consortio Microzonificación Sísmica, 2006). La roca presenta un color negro, verde oscuro o café cuando está meteorizada, se observa un intenso fracturamiento, que se hace más fuerte en las cercanías de las zonas de contacto (Consortio Microzonificación Sísmica, 2006).

Periodo Cretácico

- **Batolito de Ovejas (KtO)**

Esta unidad corresponde a la zona donde se tomaron las muestras y actualmente, es considerado un cuerpo satélite del Batolito Antioqueño, a quien corresponde en todas sus características y con quien está conectado a lo largo del valle del río Aburrá. Tiene una extensión de 165 km² entre los municipios de Bello y Sopetrán. La roca predominante es la tonalita, de tipo maciza, fanerítica equigranular de grano medio a grueso, hipidiomórfica, (Ingeominas, 2001). También afloran granodioritas y cuarzdioritas y en menor proporción dioritas, microdioritas y gabros (López, 1991 en Consortio Microzonificación Sísmica, 2006).

Periodo Cuaternario

Depósitos de Vertiente

Dentro de esta categoría de depósitos no litificados se incluyen los deslizamientos y los flujos de escombros y/o lodos. Dentro de los flujos de escombros y/o lodos, son identificados al menos cinco (5) series de eventos relacionados con depósitos de vertiente, los cuales corresponden desde el más antiguo hasta el más reciente, a NFiprel, NFI, NQFII, NQFIII, QFIV y QFa (Consortio Microzonificación Sísmica, 2006). Estos depósitos representan un arreglo escalonado o telescópico, donde los más antiguos están localizados hacia la parte media y alta de la ladera y los más jóvenes se localizan hacia la base de la vertiente (Rendón et al., 2006 en Consortio Microzonificación Sísmica, 2006).

- **Depósitos de Deslizamiento (Qd)**

Estos depósitos son el producto de fenómenos de inestabilidad o movimientos en masa ocurridos en los terrenos inclinados o vertientes, que fueron generados, en general, por la suma de factores como la gravedad, el agua, la intervención humana, etc. (Consortio Microzonificación Sísmica, 2006).

- **Flujos de escombros y/o lodos (QFa, QFIV, QFIII, NQFII, NFI, NFprel)**

Estos materiales geológicos están constituidos por flujos de varias generaciones, cuyos clastos presentan diferentes grados de meteorización. Son generados al producirse hacia las partes altas de las vertientes saturación y pérdida de resistencia, lo que las hace más vulnerables a fenómenos tales como altas precipitaciones o movimientos sísmicos. Según la granulometría de los materiales que conforman la fuente, puede darse origen a depósitos de flujo con gran predominio de bloques rocosos (en general más del 50% de bloques) denominados flujos de escombros o predominio de la fracción fina (más del 50% de matriz) que en general corresponden a limos o arcillas, en cuyo caso se denominan flujos de lodos. Dada la mecánica del fenómeno, la cual no permite una clasificación o selección del material, pueden existir dentro del mismo depósito zonas que correspondan a flujos de escombros y otras a flujos de lodos (Consortio Microzonificación Sísmica, 2006).

Depósitos Aluviales

Corresponden a los depósitos del fondo del Valle generados por el río Aburrá y algunos de sus afluentes principales. Se caracterizan por una morfología relativamente suave, dispuestos en franjas irregulares siguiendo la trayectoria de las corrientes, pueden ser del tipo aluvial o aluviotorrencial (Consortio Microzonificación Sísmica, 2006).

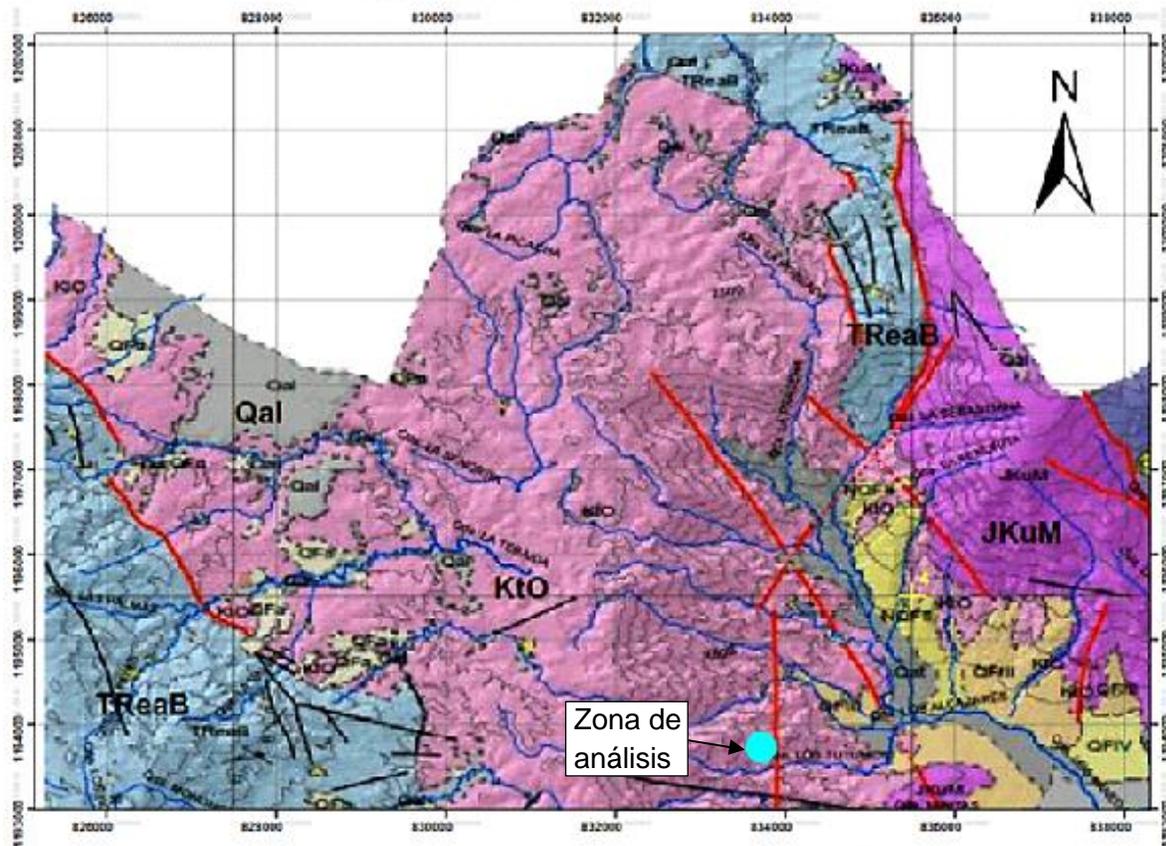
- **Depósitos Aluviales (Qal)**

Se presentan sobre los fondos de los valles del río Aburrá y sus afluentes principales, en las llanuras de inundación, como materiales de desborde; y en terrazas aluviales de diferentes niveles. Los depósitos asociados a estas zonas aluviales se caracterizan por presentar una ligera imbricación, selección moderada y alto grado de redondez de los bloques, que los diferencia de los depósitos aluviotorrenciales. Desarrollan geoformas de superficies suaves, prácticamente planas, dispuestos en franjas irregulares que siguen las principales corrientes que drenan el río Aburrá (Consortio Microzonificación Sísmica, 2006).

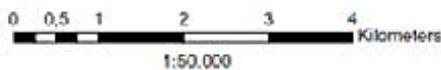
- **Depósitos Aluviotorrenciales (Qat)**

Agrupan los depósitos que generan algunas corrientes durante avenidas torrenciales, en las cuales la alta energía del agua permite arrastrar materiales de granulometría heterogénea, que incluyen desde bloques rocosos de tamaño variable hasta arenas finas, limos y arcillas. Estos materiales descienden por los cauces siguiendo un comportamiento turbulento, hasta alcanzar una zona con pendientes suficientemente suaves, donde se depositan. Esto puede ocurrir en los pequeños escalones de pendiente suave que se presentan en las laderas, o en las orillas de los cauces (Consortio Microzonificación Sísmica, 2006).

Mapa Geológico Regional



LEYENDA



Coordinate System: MAGNA Colombia Bogotá
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: MAGNA
 False Easting: 1.000.000.0000
 False Northing: 1.000.000.0000
 Central Meridian: -74.0775
 Scale Factor: 1,0000
 Latitude Of Origin: 4.0962
 Units: Meter

Unidades de roca Depósitos inconsolidados



Figura 3.6 Mapa Geológico regional de la zona de estudio. Tomado y modificado de Consorcio Microzonificación Sísmica (2006), se presenta en un círculo magenta muestra el sitio de anlysis.

4. Metodología

En el presente capítulo se describen el conjunto de actividades que se desarrollaron con el fin de implementar una metodología adecuada para la simulación de incendios, intentando siempre evitar riesgos sustanciales al ecosistema y al grupo de personas que realizaron la prueba.

4.1 Metodología para simulación de incendio

Con el fin de reproducir los efectos de los incendios sobre los suelos residuales de nuestra región, disminuyendo la cantidad de incertidumbres relacionadas al comportamiento, estructura y características de los suelos antes y después de la exposición a las altas temperaturas; se desarrolló una metodología la cual permitió reducir la cantidad de variables y poder comparar algunos comportamientos del suelo luego de un incendio.

A continuación se listan y describen las actividades empleadas para la simulación del incendio controlado.

1. Selección de sitio para la realización de la prueba:

En este caso se eligió un sitio donde basados en observaciones en cortes cercanos, se presentara poco espesor de suelo orgánico, pues se deseaba evaluar la influencia del fenómeno sobre el suelo residual y donde usualmente se presentaran zonas con arbustos bajos que permitieran una mayor exposición al fuego y el calor.

Para la realización de la prueba fue muy importante el diálogo con la comunidad, pues esto permite establecer la clase de riesgos a los que está expuesto un sitio y de esta forma prestar atención a los fenómenos que suelen presentar mayor frecuencia.

Durante la evaluación del factor social y antrópico que pudiera ocasionar los incendios, se determinó que en las fincas cercanas al sitio seleccionado, suelen realizarse siembras frecuentes, pero al consultar a las personas por la realización de incendios controlados para la preparación del suelo, estos manifestaron que la práctica no era muy común en la zona. Pero, según indicaron por experiencias en otros sitios, cuando se realizan estas quemadas, la llama no adquiriría gran altura y el tiempo depende del tamaño del sembrado.

Por último, se determinó en esta fase que el sitio seleccionado no podía ser considerado adecuada, hasta que se realizara el apique, pues con esto se validaban todas las hipótesis relacionadas con el tipo y la distribución de los materiales en el suelo.

Para la definición del sitio exacto donde se simularía el incendio, fue necesario realizar varios recorridos de campo. Identificando los perfiles de suelo, donde los espesores de material orgánico fueran lo menor posible (espesores entre 10 cm y 30 cm), y donde se tuviera la presencia del suelo residual de tonalita o granodiorita del Batolito de Ovejas.

Finalmente, se identificó un predio donde los cortes de taludes cercanos presentaban espesores de suelo orgánicos pequeños, presencia de suelos residuales y en superficie poca cobertura vegetal, reduciendo el riesgo de propagación de incendios.



Figura 4.1 Predio donde se Realiza la prueba. Fuente MAp Gis alcaldía de Medellín

En la Fotografía 4.1y Fotografía 4.2 se presentan fotografías de los materiales del sitio en las zonas cercanas donde se realizó la simulación del incendio.



Fotografía 4.1 Suelos residuales de granodiorita, típicos del batolito antioqueño.

Los taludes conformados por los suelos residuales del material recuperado se mostraron sumamente estables, incluso con cortes verticales los cuales han estado expuestos a fenómenos de intemperismo. En los taludes cercanos no se observaron desgarres ni cárcavas provocadas por el flujos de agua.

Los pequeños desgarres y grietas observadas en terrenos cercanos, están asociados a intervenciones antrópicas, tales como conformación de llenos inadecuados, o disposición de sobrecargas en sitios cercanos a la corona de los taludes.



Fotografía 4.2 Zona cercana al sitio donde se realizara el ensayo y posterior muestreo

2. Se realiza un apique para la toma de la muestra patrón:

La muestra patrón se toma para establecer cual servirá como punto de comparación para determinar las propiedades que se verán afectadas por el incendio.

La toma de la muestra requiere de un apique o excavación manual, en este caso esta tiene una dimensión de 1,3 m de profundidad y aproximadamente 1,0m de ancho. La muestra patrón tomada corresponde a un bloque. (Ya que el recipiente donde se almacenarían las muestras presentaba forma cilíndrica fue necesario tallar las muestras con esta geometría).

En la Figura 4.2 se presenta de forma esquemática la localización de la muestra respecto al talud y las excavaciones adicionales realizadas para el incendio controlado.

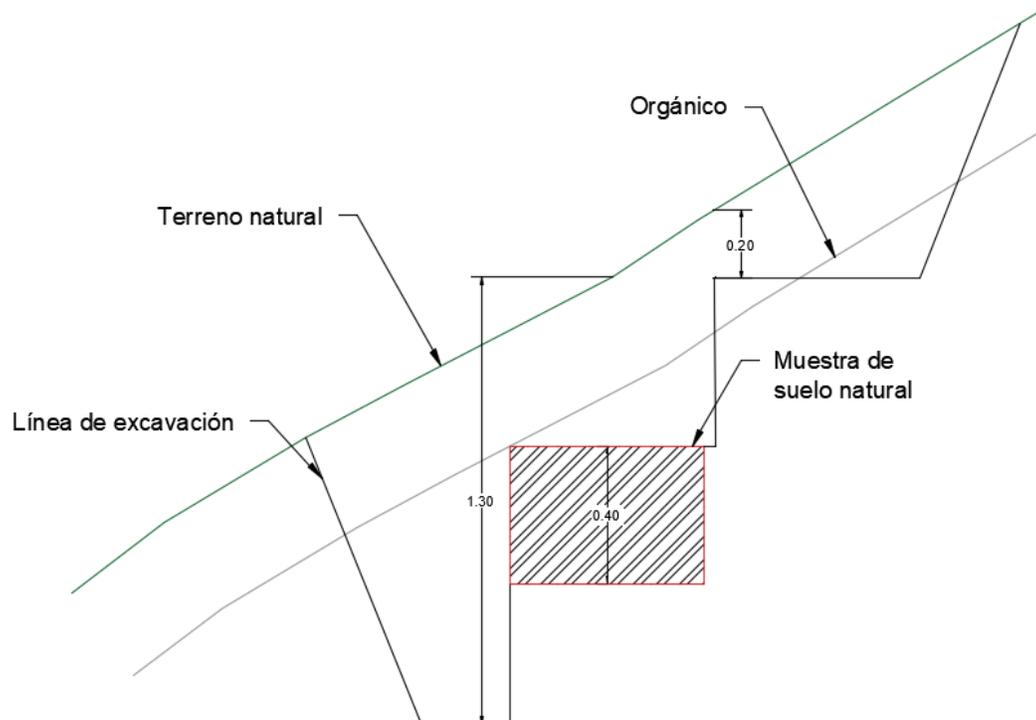


Figura 4.2 Excavación y toma de muestra suelo natural (sección lateral)

Una vez tomada la muestra y realizadas las excavaciones para el incendio controlado se procede a nivelar el fondo de la excavación y a emparejar las caras del apique como se presenta en la Fotografía 4.3



Fotografía 4.3 Apique realizado para la toma de la muestra patrón.

El perfil de suelo en este caso presentó un espesor de 30 cm de horizonte orgánico, ligeramente húmedo con un alto contenido de raíces, donde el material correspondía a un limo de color café amarillento.

Bajo este horizonte orgánico, se encuentra un suelo residual de cuarzodiorita, completamente meteorizado (VI), compuesto por arenas limosas a limos arenosos, de plasticidad media a baja, ligeramente húmedo desde los 30 cm hasta 100 cm. A partir de los 100 cm, se observa un cambio a humedades medias. Un aspecto importante que se encontró a lo largo de este horizonte fue la presencia de raíces, lo que puede ayudar al avance del frente de calor.

Ya que en la muestra donde se realizaría el incendio se retirara el suelo orgánico, se realiza lo mismo en la muestra patrón.



Fotografía 4.4 Perfil estratigráfico identificado.

Es importante mencionar que se dejó en la parte alta del corte una zona plana para, posteriormente, realizar la quema controlada.

3. Limpieza y retiro de los elementos susceptibles a combustión:
Este procedimiento se realiza en las zonas cercanas al apique, con el fin de evitar que el fuego se propague bajo ráfagas de viento u otras posibles variables, que puedan causar que el fuego se salga de control.
4. Marcación de sitios para medición de temperaturas:
Previo a la marcación de los sitios para la medición, fue necesario ampliar la excavación para facilitar las lecturas. Se procede a marcar los sitios donde se realizarán las mediciones de temperatura. En la pared expuesta del apique justo bajo la zona donde se realiza el incendio.

Se marcaron los sitios empelando pequeños tubos en el suelo con un diámetro de 1,9 cm y una longitud 4 cm aproximadamente (longitud que es enterrada), estos elementos ayudaron a que la lectura se realizara siempre en el mismo punto.

Para esta simulación se realizaron lectura a menos de 2,0 cm del tubo, intentando evitar que estas incluyeran un área mayor al interior del tubo.

Un beneficio al usar estos tubos para marcar es que ayudan a reducir un poco el efecto de pérdida de la temperatura por la interacción con el viento. Estos tramos de tubo fueron dispuestos con distancias entre 15 cm y 25 cm (variación producida por las irregularidades del suelo), intentando uniformizar las líneas de tal forma que estas quedaran rectas (ver Figura 4.3 y Figura 4.4).

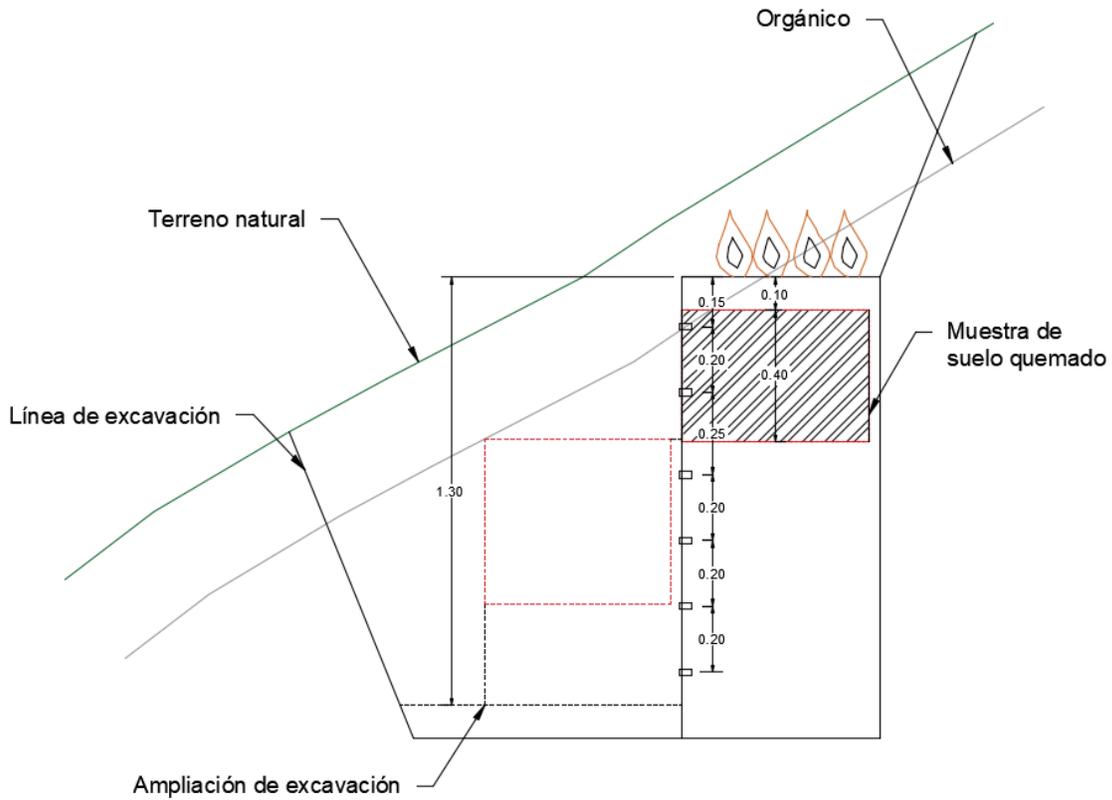


Figura 4.3 Ampliación de excavación y toma de muestra suelo quemado(Seccion lateral)

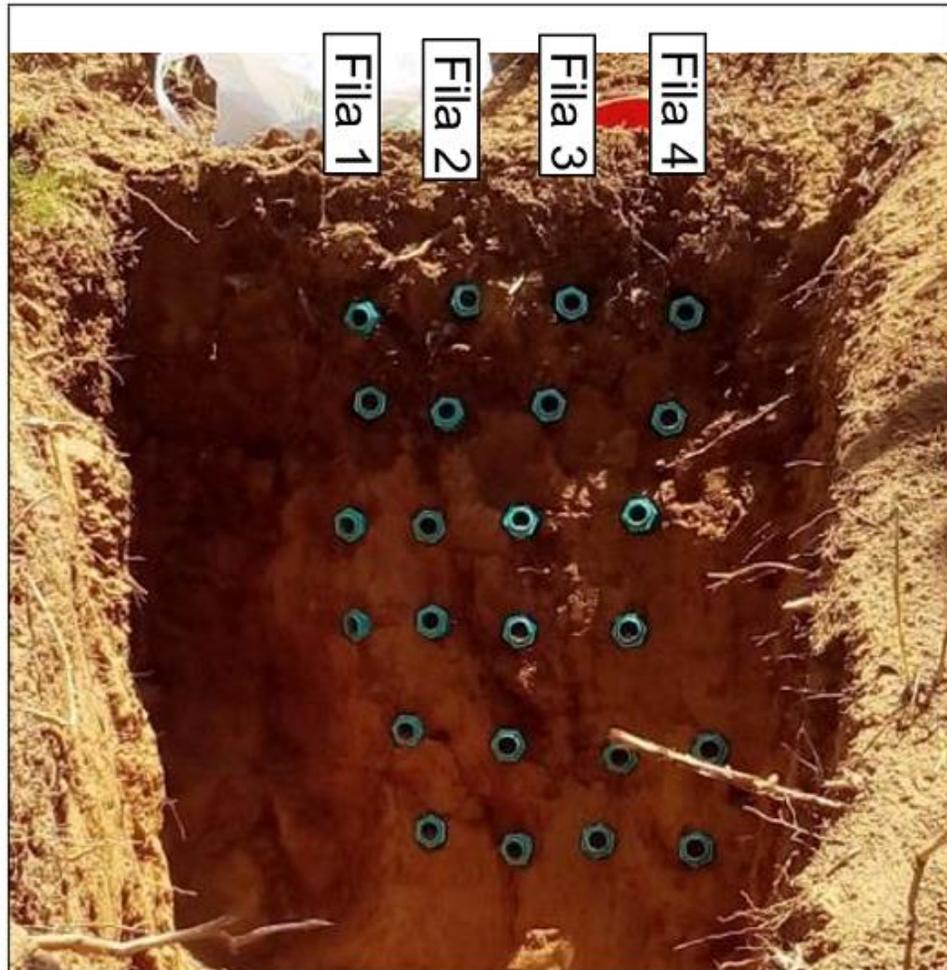


Figura 4.4 Esquema de distribución de sitios para lectura de temperatura.

5. Lecturas iniciales:

Se realiza una toma de temperaturas iniciales para establecer una condición el patrón del suelo. También, es importante marcar los sitios donde se identifican variaciones en la humedad. Para monitorearlas durante el incendio controlado

6. Inicio y toma de datos del Incendio:

Para las lecturas se emplea termómetro infrarrojo en este caso el modelo BENETECH GM- 1150, con apuntador laser. Se comienza el incendio controlado y se mantiene viva la llama empleando material similar al de la zona. (Es importante que previo a la realización de la prueba, se identifique el tipo de material combustible de la zona, se revisen los registros de los incendios cerca al sitio y se dialogue con la población para intentar establecer el tiempo y la intensidad de los incendios que se han producido).

En este caso, debido a que la zona tiene presencia de viviendas cercanas, lo que aumenta la velocidad de reacción de los bomberos y a que, solamente, se han presentado quemaduras para cultivos, se establece que: para un área de 2 m x 2 m la presencia de llamas no se dará durante más de 60 minutos.

Para la simulación del incendio se realizó un fuego indio o en estrella el cual consiste en una pirámide central de ramas pequeñas, las cuales una vez encendidas se alimentan mediante unos leños o ramas de diámetro mayor, los cuales se disponen alrededor en forma de estrella (ver Figura 4.5). Este tipo de fogata tiene la ventaja que mantiene una llama baja generan poco humo y un calor intenso (Salazar, 2015). El tipo de fogata aunque no es el que más calor transfiere al suelo (el que mayor calor transfiere corresponde al fogón polinesio) pero es el más cercano a lo que ocurre durante un incendio y adicionalmente permite alimentar el fuego para mantener la llama lo más constante posible.



Figura 4.5 Esquema básico de fogata india en estrella (Salazar, 2015)

Se programan lecturas de la temperatura del talud cada cierto tiempo, para garantizar que si se están presentando incrementos. Particularmente, para este caso se realizaron mediciones cada 10 minutos. Decisión que se debe tomar en función de la duración del incendio controlado.

7. Finalización y toma de muestra:

Al terminar la prueba se apagan las llamas, retirando primero el material combustible y apagando los brasas restantes con suelo, pues el uso de agua podrá ocasionar modificaciones a las condiciones de humedad del suelo (ver Fotografía 5.3).

Previo a la toma de la muestra se retiraron aproximadamente 10 cm de residuos de incendios, ramas y el suelo empleado para apagar las cenizas que quedaron en la superficie. Posteriormente, se realizó la toma de la muestra de suelo utilizando la misma metodología que se usó para la toma del suelo natural.(ver

Esta metodología se efectuó intentando seguir los patrones típicos de una quema controlada o un incendio forestal, en el cual el fuego suele avanzar, diferenciando los tiempos totales del incendio y el tiempo de exposición de un sitio particular y estableciendo condiciones seguras para reducir el riesgo de propagación de las llamas, de tal forma que permita la toma de datos durante la prueba.

4.2 Metodología para recolección de muestras

La recolección de muestras que se realizó para la validación de los resultados involucró tanto muestras afectadas en estado natural, como otras afectadas por el incendio

controlado. Estas muestras permitieron la adecuada caracterización física, mecánica, mineralógica y química mediante pruebas de laboratorio.

Las muestras recuperadas son consideradas como inalteradas intentando mantener la estructura del suelo residual.

Estas muestras se tomaron siguiendo un procedimiento similar al mencionado por la norma ASTM D7015-13 para muestras cúbicas y cilíndricas, pero cambiando el cubo en madera por un recipiente plástico con soportes que facilitarán el traslado de las muestras, luego de tomadas, pues las pendientes del sitio en particular dificultaban el transporte.

Las muestras recuperadas correspondieron a dos muestras cilíndricas, una de ellas afectada por las altas temperaturas y otra en condición natural. Verificando que durante la recolección de muestras el perfil del suelo residual fuera el mismo y que las muestras tuvieran la menor influencia posible de suelos orgánicos.

Las muestras recuperadas en este caso corresponden a un horizonte de meteorización VI, el cual ha perdido casi toda la estructura del material parental. Adicionalmente, se pudo verificar que en las muestras recuperadas existía la influencia de raíces que ayudaron a la propagación del fuego en profundidad.

Inicialmente se toma una muestra inalterada justamente al lado de la muestra que será sometida a la prueba. En los numerales 2 y 7 del capítulo 4.1.

4.3 Ensayos de laboratorio

Las muestras tomadas fueron llevadas al laboratorio de Geotecnia y Pavimentos de la Facultad de Minas (Universidad Nacional de Colombia), sitio donde fueron realizados la mayoría de los ensayos físicos y mecánicos. Mientras que los ensayos químicos y de microscopía electrónica se realizaron en otros laboratorios de la Universidad.

El capítulo desarrollado a continuación corresponde a la descripción de las metodologías empleadas para la ejecución de dichos ensayos.

4.3.1 Caracterización física

A continuación se describen los diferentes ensayos físicos realizados

- Contenido de humedad natural:

En este caso se empleó la norma ASTM D2216-10, n.d.

.

- Gravedad específica de los sólidos, G_s:

Para la prueba se empleó la norma ASTM D854-10.

- Análisis granulométrico:

Estos ensayos son regulados por la Norma (ASTM D422-63, n.d.). Adicionalmente se realiza también una prueba variando lo mencionado por la norma emplear agua como fluido defloculante Prueba de doble hidrómetro).

- Límites de Atterberg:

La norma con la que fueron elaborados los ensayos corresponden a la (ASTM D4318-10, n.d.).

- Clasificación MCT rápida:

Esta clasificación ha sido utilizada típicamente para suelos tropicales, los cuales son más usuales en nuestras latitudes. En este caso la razón para el uso de esta clasificación es debido a que esta brinda información de la contracción por desecación lo que puede ayudar a explicar el comportamiento del suelo después de ser sometido al incremento de temperatura.

Dicho método se propuso en el año 1995 por Nogami & Villibor, (Nogami,1995) a continuación se expone de forma breve dicha metodología.

Se seca el material al aire y se pasa por el tamiz número 40, procedimiento con el que se eliminan los sobre tamaños. Posteriormente se emplea agua destilada y se mezclan, usando la espátula, hasta alcanzar una masa moldeable. El material deberá alcanzar una consistencia tal que, una capa de material de 1cm de altura evite que un penetrómetro plano, de 1,3 mm de diámetro y 10 g de peso, dejado caer desde una altura de 4 cm, penetre más de 1 mm.

Luego, el material se coloca en tres anillos de PVC de 2,0 cm de diámetro y 0,5 cm de alto y se deja al aire un mínimo de 6 horas. Pasado este tiempo se miden nuevamente las muestras y se calcula la contracción C_t (diferencia entre diámetro inicial o diámetro del anillo y diámetro final).

Por último, se colocan las muestras sobre un papel filtro y una piedra porosa saturada y en contacto con agua, de forma que las muestras puedan absorber agua durante 2 horas, y posteriormente se realiza nuevamente la prueba del penetrómetro y se calcula la penetración.

Posteriormente, con el valor calculado de C_t se estima la constante c' según se muestra en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Estimación de la constante c' a partir de c_t

ct entre 0.1 mm y 0.50 mm	Para ct mayor a 0.60 mm
$c' = \frac{(\log_{10} ct + 1)}{0,904}$	$c' = \frac{(\log_{10} ct + 0,7)}{0,5}$

Finalmente con el valor calculado de c' y la penetración, se clasifica el suelo según se muestra en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2: Grupos de clasificación MCT rápida. Modificado de (Nogami & Cozzolino, 1985))

Coef. C'	0,2	0,5	0,9	1,3	1,7		
Penetración (mm)	4	NA-NS'	NS'-NA'	NS'/NA'	NS'-NG'	NG'	
	3	NA	NA'/NS'	NA'-NS'	NA'/(NG'-NS')		
	2	LA	LA-LA'	LA'	LA'-LG		LG'
	0						
	0	0,15	0,22	0,55	0,9	1,4	(mm)
		Contracción diametral					

Las siglas mencionadas según el grupo MCT corresponden a LG': Arcillas lateríticas y arcillas lateríticas arenosas, LA': Arenas arcillosas lateríticas, LA: Arena con poca arcilla laterítica, NG': Arcillas, arcillas limosas y arcillas arenosas no lateríticas, NS': Limos caoliníticos y micáceos, limos arenosos y limos arcillosos no lateríticos, NA': Arenas limosas y arenas arcillosas no lateríticas y finalmente NA: Arenas limosas con limos cuarzosos y limos arcillosos no lateríticos. El símbolo "-" señala opción equivalente mientras que "/" señala que dicha opción tiene mayor peso la primera clasificación.

4.3.2 Caracterización mineralógica y estructural

Tanto en los suelos residuales como los tropicales, el comportamiento mecánico está fuertemente influenciado por la caracterización química y la estructura del material,

características que pueden ser determinadas a partir de ensayos de difracción de rayos X y microscopia electrónica de barrido.

- Difracción de rayos X:

La difracción de rayos X es uno de los métodos más usados para caracterizar la estructura de los suelos de grano fino y simultáneamente identificar los minerales (ASTM, 1970). Este método se basa en determinar los espacios entre planos atómicos, los ángulos de incidencia y de difracción de los electrones con que se barre la muestra, información a partir de la cual es posible identificar los minerales existentes, al compararlos con una amplia base de datos de materiales.

La clasificación de los minerales se realiza de forma comparativa por medio de superposición de difractogramas (se superponen los obtenidos con los existentes en la base de datos) y de esta forma se establecen los que tienen mayor coincidencia.

Generalmente, para la realización de esta prueba se toma una muestra de suelo la cual se seca al aire y luego se pasa por el tamiz 200, garantizando que solamente se evalúe la fracción en tamaño fino. Así se determinan los patrones propios de las estructuras cristalinas.

- Microscopia electrónica de barrido (SEM)

EL microscopio electrónico de barrido es un equipo que permite la toma imágenes de alta resolución de la microestructura de los materiales, lo que posibilita establecer su morfología. Estas imágenes se toman sobre las muestras afectadas por el fuego y sobre las inalteradas, permitiendo realizar comparativos entre las estructuras de ambos.

La microscopía electrónica de barrido se realizó con un equipo SEM Carl Zeiss EVO MA10. El cual, requiere que las muestras se recubran con una capa de oro o grafito, las cuales se ponen en el vacío y se barren con un haz de electrones los cuales fueron acelerados mediante una diferencia de potencial, proceso que ocurre dentro de la columna del microscopio, posteriormente se captan los electrones empleando un detector de electrones secundarios (SE) y uno de electrones retrodispersados BSD (Fotografía 4.5).



Fotografía 4.5: Microscopio Electrónico de la Universidad Nacional – Sede Medellín, laboratorio de Materiales.

Las muestras seleccionadas se cubrieron con una capa delgada de oro de aproximadamente 10nm de espesor. Lo que aumenta la conductividad en la superficie pues la resolución es disminuida por los materiales no conductores (Fookes, 2004).



Fotografía 4.6: Preparación de las muestras al recubrirlas con oro para el ensayo de microscopía electrónica de barrido.

4.3.3 Caracterización química

Esta serie de ensayos químicos corresponde a ensayos de pH en agua y KCl y contenido de elementos menores, pruebas que fueron realizadas en el Laboratorio de Suelos de la

Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. En la Tabla 4-3 se presenta la norma bajo la cual se realizan estas pruebas.

Tabla 4-3: Ensayos realizados dentro de la caracterización química.

ENSAYO	NORMA
pH en agua	NTC - 3651
pH en KCl	NTC - 3651
Al, Ca, Mg, K, P y elementos menores (Cu, Fe, Mn, Zn)	NTC - 5151

Para el análisis de los resultados fue necesario calcular el punto de carga cero, empleando la expresión indicada por Camapum (2015).

$$PCZ = 2 * pH_{KCL} - pH_{H2O}$$

El “punto de carga zero” es el valor del pH para el que alguno de los componentes de la carga superficial se hace cero, dicho valor es importante pues a valores del pH más próximos a PCZ se presenta una mayor floculación o formación de agregados. (Morell, 1998).

4.3.4 Caracterización mecánica

La caracterización mecánica permite establecer el comportamiento del suelo ante la aplicación de cargas y simultáneamente estimar parámetros de resistencia, que permiten al geotecnista predecir el comportamiento bajo condiciones particulares.

- Corte directo tipo Consolidado Drenado (CD):

En este caso en particular el corte CD fue consolidado drenado, permitiendo a la muestra drenar el agua. (ASTM D3080-11, n.d.). La finalidad de este ensayo era detectar si existían cambios en los parámetros de resistencia del suelo que pudieran contribuir al incremento de la erodabilidad.

- Curva característica (Succión)

Para estos ensayos se construyeron las curvas de succión, a partir de la metodología del papel filtro propuesta por Marinho (1994), método adaptado a partir de la norma ASTM D5298 – 10 (Marinho recomienda evitar el secado del papel durante las 16 horas).

Para estas pruebas se emplearon muestras, tanto del material quemado como natural, las cuales fueron talladas con un diámetro aproximado de 45 mm y 20 mm de altura, medidas aproximadas pues las muestras quemadas fueron sumamente complicadas de tallar debido a la baja humedad y a su comportamiento frágil. Estas muestras se sometieron a diferentes rangos de humedad, comenzando por humedades desde 3% hasta 33%, intervalo que incluyó el valor de la humedad natural de las muestras.

A cada una de estas muestras se le colocaron tres papeles filtro en la cara inferior, con el fin de determinar la succión matricial, mientras que en la cara superior se dispuso una rejilla que separara los dos papeles filtro de la muestra, permitiendo determinar la succión total de forma simultánea.

Cada una de estas muestras se cubre con papel vinilo y papel aluminio, para que mantengan su humedad y la transfieran de forma progresiva a los papeles filtro, durante los 15 días que toma la prueba. Por lo que cada una de las muestras, se asume, entra en equilibrio en este lapso de tiempo.

Finalmente pasados los quince días se procede a pesar cada uno de los papeles filtro, que no están en contacto directo con la muestra. Una vez obtenido dicho valor es posible estimar la succión pues el papel empleado fue previamente calibrado (Chandler *et al.*, 1992), las ecuaciones características del material empleado se presentan a continuación :

Para humedades de papel filtro $w > 47\%$:

$$\text{Succión [kPa]} = 10^{(6,05 - 2,48 * \log w)}$$

Para humedades de papel filtro $w \leq 47\%$:

$$\text{Succión [kPa]} = 10^{(4,84 - 0,0622 * w)}$$

A continuación se presentan un esquema típico de la prueba (ver Figura 4.6).

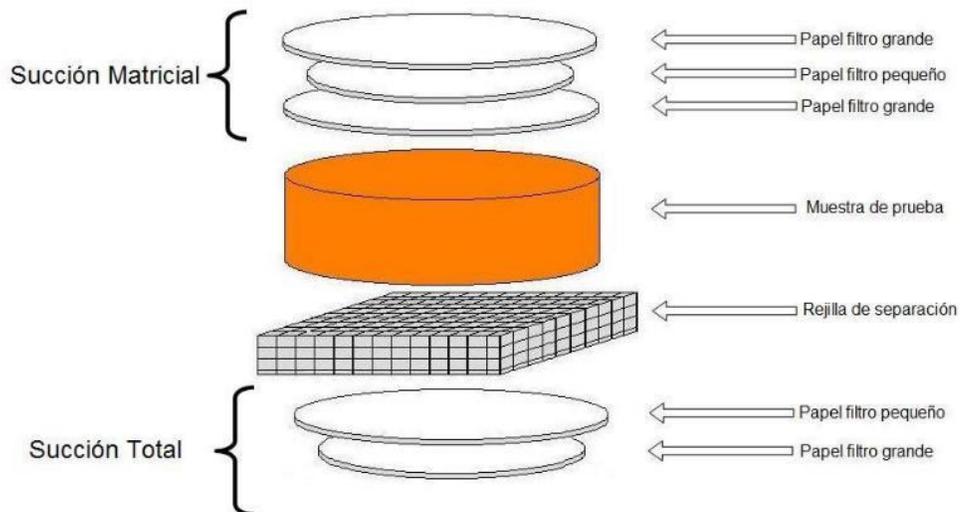


Figura 4.6: Montaje del ensayo de succión por el método del papel filtro (extraído de Efecto de los lixiviados de residuos sólidos en las propiedades geotécnicas de un suelo tropical, Quintero 2016).

- *Pinhole test*

El ensayo pinhole permite identificar el comportamiento erodable de un suelo (erodabilidad interna) , mediante una prueba simple, en la cual, se talla una muestra cilíndrica que se perfora con un agujero de 1mm de diámetro, por el que se deja pasar agua a diferentes cargas hidráulicas (Camapum de Carvalho, *et al* 2006). La prueba se realiza siguiendo la norma Brasileira NBR 14114/98 (Asociación Brasileira de Normas Técnicas, ABNT).

Durante la prueba se optó por realizar siete ciclos, los cuales aumentan la carga hidráulica hasta el cuarto ciclo y posteriormente disminuyen en los tres últimos ciclos, llegando hasta la carga inicial.(NBR 14114/98) Es importante que durante cada uno de los ciclos se midan los caudales y se observe la turbidez del agua.

Respecto a este ensayo se presentaron inconvenientes en los suelos quemados, debido a que el registro de caudales tan altos impidió elevar la carga hidráulica lo suficiente para realizar las siete pruebas, por lo que solamente fue posible realizar cinco ciclos , los tres primeros ciclos aumentando la carga hidráulica y los siguientes disminuyéndola.

- Desagregación:

El ensayo de desagregación se usa para verificar la estabilidad de una muestra de suelo ante la exposición al agua destilada. Para la ejecución de este ensayo, se siguen las indicaciones de la prueba mencionadas por Camapun en el año 2006.

Para realizar el ensayo se emplean muestras de suelo cúbicas de 0,06 m de lado, las cuales se colocan en bandejas por separado y posteriormente se llenan los recipientes en varias fases, la primera fase corresponde a llenar con agua destilada hasta 1/3 de la altura de la muestra, posteriormente a 2/3, finalmente se llena por completo y se deja la muestra inmersa por 24 horas.

Durante cada fase se debe registrar lo observado y la manera en que esta se desagrega, ya sea total o parcialmente.

- Inderbitzen

Este ensayo fue un desarrollado para la medición de la erodabilidad de forma cuantificable. Este ensayo permite simular las situaciones de erosión hidráulica observada en campo, dentro del laboratorio, para evaluar las condiciones que propician este tipo de erosión. Una de las ventajas particulares de la maquinaria empleada para el ensayo, es que esta permite realizar cambios en variables iniciales como la pendiente, el caudal o el tipo de material a probar. (ver Figura 4.7)

La metodología aplicada corresponde a una variación del ensayo propuesto por Bastos en 1999 (Silva 2016), pues aunque las dimensiones de la canaleta son las mismas solo se evaluó una pendiente, la cual corresponde a 30°, que está dentro del rango típico propuesto, el cual varía entre 0° y 54° (Silva2016) y un caudal que esta entre 3 litros/min y 6 litros/min.

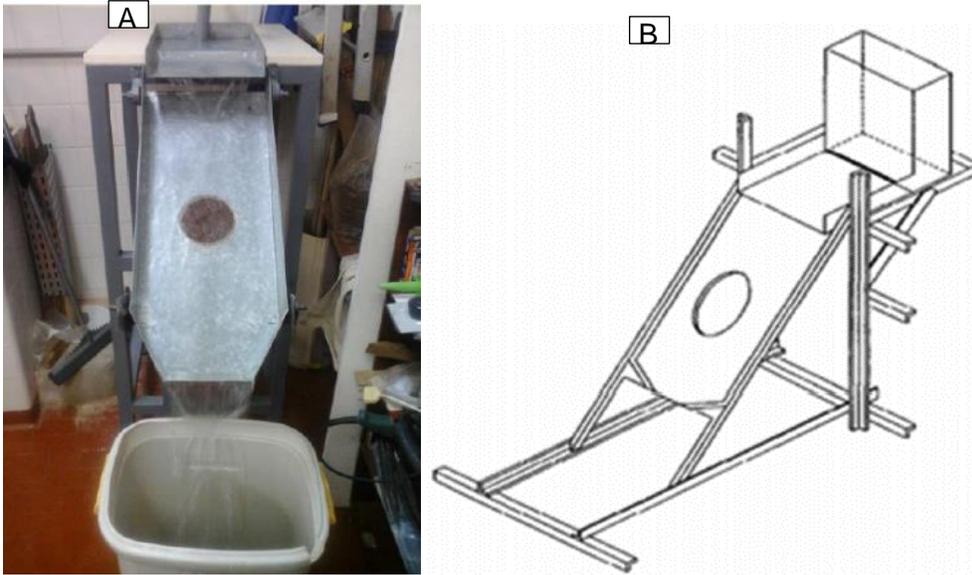


Figura 4.7 A. Máquina para ensayo Inderbitzen (Ferreira, 2015), B Esquema de maquinaria para ensayo nderbitzen (Silva , 20)16.

En la Fotografía 4.7 presenta el canal construido para el ensayo *Inderbitzen*, pues esta prueba aún no se aplicaba en el país. En este canal el suministro de agua se realiza mediante una manguera con orificios, que descargan el fluido, el cual corre sobre la superficie arrastrando partículas de suelo de la muestra, llevándolas a un recipiente el cual posteriormente se lleva al horno para que evapore el agua y queden únicamente las partículas de suelo.



Fotografía 4.7 Aparato para ensayo Inderbitzen, fabricación propia

La medición de la erosión se realiza empleando la siguiente ecuación.

$$E = \frac{Ps}{A}$$

Dónde:

E: erosión (g/cm^2)

Ps: Peso de suelo seco (g).

A: Área superficial

Es importante mencionar, que el suelo seco que se tiene en consideración en la ecuación presentada corresponde al suelo capturado por los diferentes tamices al final del canal, o en nuestro caso particular el suelo que se obtiene en el recipiente final, luego de realizar la prueba.

5. Resultados y análisis

5.1 Simulación del incendio

Durante la simulación del incendio se tomaron lecturas de la temperatura del suelo, en la pared del apique que estaba bajo el sitio donde se realiza la simulación del incendio, con el fin de entender cómo avanzaba el frente de calor a lo largo del suelo durante la prueba.

En las mediciones iniciales de temperatura (Sin comenzar el incendio) se pudo constatar que el perfil de suelo presenta temperaturas entre 22° y 27°. Estas variaciones en la lectura son muy coherentes con la condición natural, pues las temperaturas más altas se presentaron típicamente en la sección más superficial del apique, mientras que las bajas se obtuvieron al fondo. Esto se explica por dos razones: la primera, es que la parte más profunda del perfil, exhibe una humedad mayor que ayuda a disipar el calor. La segunda razón, es que el calor que gana la superficial se transmite en profundidad pero a medida que aumenta la distancia respecto a la fuente (Suelo expuesto directamente al sol) se pierde energía calórica, razón por la cual no se registran temperaturas más altas a mayor profundidad.

Una vez iniciado el incendio se toman las lecturas de temperatura en superficie, hasta alcanzar más de 1000 grados (ver Fotografía 5.1), lo que se logra luego de 17 minutos de comenzar el fuego. En función de estos resultados, se esperó a que se completarán 20 minutos y se inició la toma de lecturas (Se dejó avanzar tres minutos luego de la lectura de los 17 minutos y se inició la toma de tiempos de la prueba)



Fotografía 5.1 Temperaturas tomadas en superficie (1250 C°) y a 2,0 cm de profundidad (733 C°).

Luego de iniciada la prueba se alimenta constantemente el fuego intentando mantener la llama constante y se observa que estos puntos más próximos a la superficie suelen presentar temperaturas que están alrededor de los 800 grados a lo largo de la prueba y una vez se deja de alimentar el fuego, pasados 10 minutos se observa un descenso de la temperatura cercano a los 750°.



Fotografía 5.2 Las dos fotografías de la izquierda son tomadas al finalizar la prueba, las dos fotografías siguientes son lecturas, pasados 10 minutos de la finalización.

Respecto a las lecturas realizadas, se tomaron 4 lecturas. En los puntos marcados se logró identificar que la temperatura mínima alcanzada es de 30° cerca del fondo y la más altas de 838 a 2 cm de la superficie, pero no fue posible establecer que el aumento de las temperaturas fuera uniforme en relación con la aproximación a la superficie, pues se observaron puntos calientes, lo que al parecer es producto de las raíces, las cuales transmiten el aumento de la temperatura e incluso llamas a niveles inferiores.



Fotografía 5.3 Finalización de la prueba realizada.

Entre la Tabla 5-1y la Tabla 5-5 se presentan los resultados de las temperaturas registradas , y también se muestra con un formato de colores los datos, de tal forma que permita identificar las zonas que menos han ganado temperatura y las que más lo han hecho.

Es importante mencionar que, en dichas tablas fue necesario interpolar valores entre los puntos donde se contaban con lecturas, pues esto reduce los cambios abruptos entre colores y ayuda a visualizar los datos con mayor facilidad (Las lecturas interpoladas están a 25 cm, 45 cm, 70 cm, 90 cm y a 110cm).

Tabla 5-1 Registros de Lecturas de temperaturas obtenidas en el experimento (Lectura a 20 minutos)

Distancia respecto a la superficie	Fila 1	Fila 2	Fila 3	Fila 4
2 cm*	800,0	783,0	775,0	791,0
15 cm	53,0	82,0	42,6	44,4
25 cm	43,2	57,2	38,1	39,3
35 cm	33,3	32,4	33,6	34,2
45 cm	32,7	32,6	33,0	33,6
60 cm	32,1	32,8	32,4	33,0
70 cm	33,1	32,9	33,2	33,3
80 cm	34,0	33,0	34,0	33,6
90 cm	33,7	32,7	32,3	32,7
100 cm	33,3	32,3	30,5	31,8
110 cm	31,9	32,0	31,6	31,2
120 cm	30,5	31,7	32,6	30,5

* Las lecturas tomadas a 2,0 cm implicaban alejar sustancialmente la pistola para lectura debido al calor (30 cm a 40 cm aproximadamente), el instrumento empleado tiene una relación distancia diámetro D:S 50:1 lo que implica que la lectura a pudo abarcar una circunferencia de 0,6 cm a 0,8 cm de diámetro por lo que es posible que las altas temperaturas registradas incluyeran parte de la temperatura en superficie.

Tabla 5-2 Registros de Lecturas de temperaturas obtenidas en el experimento (Lectura a 30 minutos)

Distancia respecto a la superficie	Fila 1	Fila 2	Fila 3	Fila 4
2 cm	838,0	821,0	804,0	743,0
15 cm	41,4	65,0	45,0	43,0
25 cm	41,4	52,8	41,4	40,6
35 cm	41,4	40,5	37,8	38,2
45 cm	39,4	39,5	38,4	39,1
60 cm	37,3	38,4	39,0	40,0
70 cm	39,5	38,2	40,1	41,0
80 cm	41,6	38,0	41,2	41,9
90 cm	41,1	40,2	40,8	42,1
100 cm	40,6	42,3	40,3	42,3
110 cm	40,1	40,6	39,7	41,7
120 cm	39,6	38,8	39,0	41,0

Tabla 5-3 Registros de Lecturas de temperaturas obtenidas en el experimento (Lectura a 40 minutos)

Distancia respecto a la superficie	Fila 1	Fila 2	Fila 3	Fila 4
2 cm	774,0	762,0	751,0	728,0
15 cm	48,5	50,3	47,3	52,6
25 cm	44,1	46,0	43,8	46,8
35 cm	39,6	41,6	40,3	41,0
45 cm	39,1	41,0	39,6	40,9
60 cm	38,5	40,3	38,8	40,7
70 cm	40,1	39,2	37,7	38,2
80 cm	41,6	38,0	36,5	35,7
90 cm	38,9	36,9	36,7	39,0
100 cm	36,1	35,8	36,8	42,3
110 cm	35,4	34,4	36,0	39,3
120 cm	34,6	33,0	35,1	36,2

Tabla 5-4 Registros de Lecturas de temperaturas obtenidas en el experimento (Lectura a 50 minutos)

Distancia respecto a la superficie	Fila 1	Fila 2	Fila 3	Fila 4
2 cm	820,0	813,0	794,0	801,0
15 cm	67,3	62,3	65,1	61,2
25 cm	55,9	52,8	54,2	51,9
35 cm	44,4	43,3	43,2	42,6
45 cm	44,0	43,9	44,1	43,0
60 cm	43,6	44,5	45,0	43,3
70 cm	43,3	43,2	44,4	42,6
80 cm	43,0	41,8	43,7	41,9
90 cm	42,6	41,4	43,7	42,5
100 cm	42,2	41,0	43,6	43,1
110 cm	40,7	40,3	41,9	41,9
120 cm	39,1	39,6	40,2	40,7

Tabla 5-5 Registros de Lecturas de temperaturas obtenidas en el experimento (Lectura a 60 minutos)

Distancia respecto a la superficie	Fila 1	Fila 2	Fila 3	Fila 4
2 cm	762,0	771,0	758,0	752,0
15 cm	43,8	50,2	45,3	42,4
25 cm	40,6	45,5	42,2	41,0
35 cm	37,3	40,7	39,0	39,5
45 cm	38,4	40,0	39,9	40,8
60 cm	39,5	39,2	40,7	42,0
70 cm	39,0	39,4	39,4	40,6
80 cm	38,4	39,5	38,0	39,2
90 cm	38,4	39,3	38,8	39,1
100 cm	38,3	39,1	39,5	39,0
110 cm	37,8	38,0	38,4	38,3
120 cm	37,3	36,9	37,2	37,6

De las tablas presentadas no es posible establecer que el calor avance uniformemente desde la superficie del terreno hacía abajo, esto se deberá en gran medida a la transferencia de calor que se da a través de las raíces y a que, el suelo, pudiera presentar algunas variaciones en el contenido de humedad.

También es posible observar que la temperatura no siempre aumenta con el tiempo, lo que se debe a que la fuente de calor no mantiene una temperatura constante, pues depende del material en combustión en superficie, de la transferencia del calor a través de las raíces y de otros factores externos como el viento.

Se observó en los registros la presencia de puntos calientes, los cuales se presentan sin un patrón característico a lo largo del experimento. Solamente, en la fila 2 de las lecturas

se logra observar que, el avance del frente de calor tiende a llegar a un nivel un poco más profundo que los restantes (Respuesta que se repite en todo el experimento).

De igual manera, existen respuestas del suelo que eran bastante predecibles, como lo son:

- Las temperaturas más altas suelen presentarse en los primeros 25 cm del suelo.
- Las temperaturas más bajas se registran hacia la parte más alejada de la superficie. Específicamente, en este caso se observa que las lecturas realizadas a profundidades mayores a 100 cm tienden a ser menos altas que las registradas de este nivel hacia arriba.

5.2 Resultados del laboratorio

A continuación se presentan los resultados, el análisis y la comparación de la respuesta del suelo entre los ensayos realizados sobre las muestras en condición natural y los suelos que fueron sometidos al efecto de la simulación de incendio.

5.2.1 Caracterización física

En la Tabla 5-6 se presentan los resultados obtenidos relacionados con la caracterización física. Resultados que se analizan a continuación:

Tabla 5-6: Propiedades físicas de las muestras analizadas (Valores promedio).

PROPIEDAD FÍSICA		MUESTRA NATURAL	MUESTRA QUEMADA
Humedad natural, w_{nat} [%]		22	15
Límite líquido LL [%]		50	60
Límite plástico LP [%]		27	33
Índice de plasticidad, IP [%]		23	27
Hidrómetro en agua	Contenido de gravas	0	0
	Contenido de arenas	54	65
	Contenido de limos	42	31
	Contenido de arcillas	4	4
Hidrómetro en defloculante	Contenido de gravas	0	0
	Contenido de arenas	52	56
	Contenido de limos	38	35
	Contenido de arcillas	10	9
Gravedad específica, G_s		2,45	2,5
Clasificación según USCS		SC-SM	SC-SM
Clasificación MCT		NA'/NG'-NS'	NA'/NG'-NS'
Contracción ensayo MCT(CT)		0,99	1,40
Relación de vacíos, e		1,00	1,07

5.2.2 Contenido de humedad natural

Esta prueba, aunque simple y sumamente predecible, corresponde al primer resultado, en el que se demuestra que la exposición a las altas temperaturas, produce cambios en el suelo residual. Se puede observar que a lo largo de todas las pruebas de humedad, el suelo en condición natural presenta humedades mayores a las del suelo sometido a altas temperaturas.

Se pudo establecer que en promedio, la variación del contenido de humedad entre las muestras naturales y las quemadas para el suelo residual evaluado, fueron de un 32% de la humedad natural. Resultado que puede ser explicado por la exposición del suelo al calor, causando en éste un fenómeno de evaporación del agua, reduciendo el contenido de humedad.

Es relevante resaltar que aunque se alcanzaron temperaturas sumamente altas durante la prueba, la pérdida de humedad no fue tan elevada como se esperaba.

5.2.3 Límites de consistencia (clasificación según USCS)

Para la determinación de los límites de consistencia de la fracción del suelo que pasa el tamiz 200°, dichas pruebas se realizaron conservando la humedad natural del material. Los ensayos de límites practicados a dos muestras naturales y dos quemadas (donde cada ensayo incluye tres puntos), arrojaron resultados similares entre sí, por lo que a continuación se presenta una gráfica con el promedio de dichas pruebas.

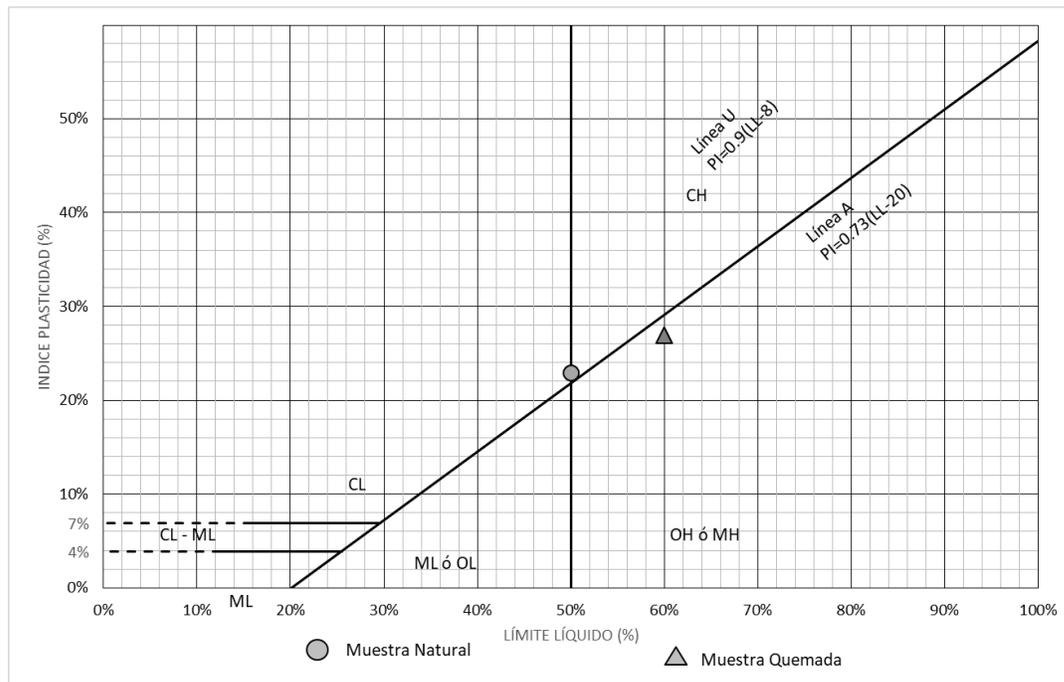


Figura 5.1: Carta de plasticidad con resultados obtenidos.

Tal como se muestra en la Figura 5.1 la clasificación de la fracción fina (limos y arcillas) mediante límites de Atterberg de las muestras naturales y sometidas a altas temperaturas, presentan pequeñas diferencias, las cuales no sugieren cambios sustanciales en las clasificaciones del suelo. Es importante mencionar que, aunque los ensayos de hidrómetro indican que existen agregaciones en las partículas de los suelos sometidos a incendios, dichos cambios no son lo suficientemente grandes para causar disminuciones considerables de la plasticidad.

En la Figura 5.1 se observa que existen incrementos tanto en los límites líquidos, como en los índices de plasticidad de los suelos sometidos a los incendios. Aunque, el aumento en el límite de plasticidad al ser función del límite líquido, está fuertemente influenciado por el aumento del mismo.

En la Figura 5.2 se presenta una gráfica que indica la cantidad de golpes versus el contenido de humedad, obtenidos para la estimación del límite líquido, tanto de las muestras sometidas al incendio, como de las muestra patrón.

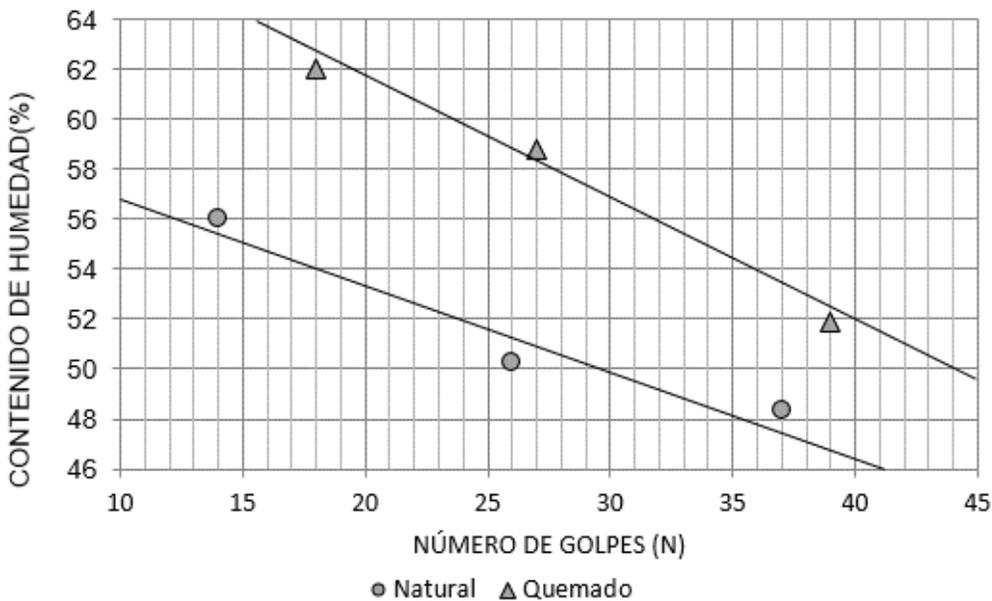


Figura 5.2: Curva de fluidez de las muestras con humedad natural.

De la Figura 5.2, se puede concluir que existe una variación en la resistencia del suelo sometido a incendios respecto al suelo natural, pues se observa que la curva trazada para el suelo quemado (bajo los rangos de humedad evaluados) siempre está por encima de la natural. Ya que no existen modificaciones sustanciales en la clasificación de la fracción fina, como se concluyó en la Figura 5.1, el incremento en la resistencia del suelo quemado puede ser explicado por el efecto en la succión osmótica (ver capítulo 5.5), succión que aumento en los suelos quemados producto del cambio en la química. (Se pueden validar de los ensayos de microscopia e hidrómetro).

Si bien existe un aumento en la succión osmótica, es importante exponerle al lector que el incremento de la resistencia que se obtuvo durante estos ensayos (incremento de resistencia causado por la química), no se reproduce en las muestras talladas y sometidas a ensayos de resistencia, como: corte directo, ya que las agregaciones y la contracción que sufre el suelo quemado, producen microfisuras, que generan reducciones sustanciales de la resistencia, lo que se analiza con mayor detalle en el capítulo 5, numeral 5.5.2

A continuación en la Figura 5.3 se plasman los cambios que sufren los suelos quemados en los límites líquidos y plásticos, respecto a los valores obtenidos para los suelos naturales.

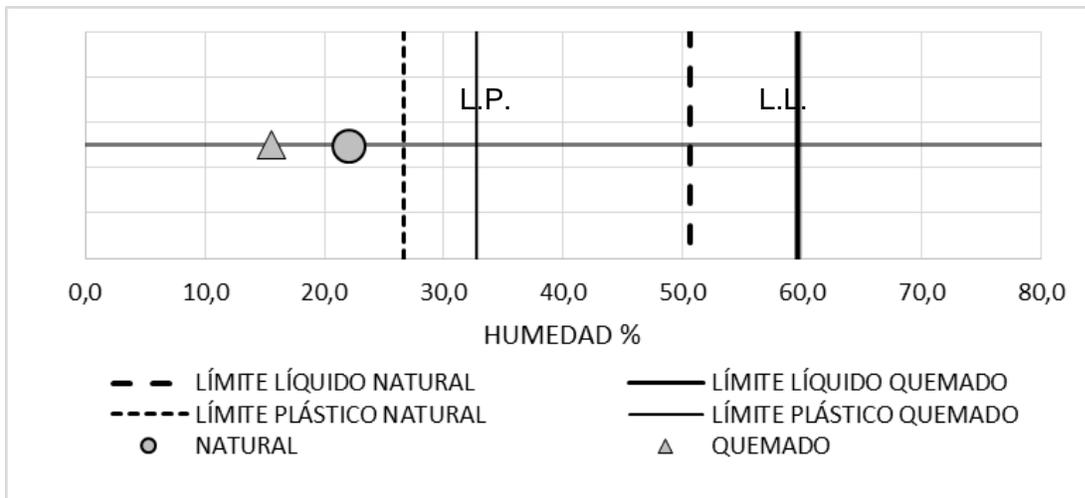


Figura 5.3: Límites de consistencia de las muestras analizadas comparadas con la humedad natural.

Basado en la Figura 5.3 es posible validar que los valores de límite líquido y límite plástico de las muestras quemadas, corresponden a una mayor humedad, lo que puede ser explicado por el incremento en el contenido de hierro y magnesio (iones de carga positiva), lo que causa que la carga en la superficie de la partícula sea positiva, y como típicamente las moléculas de agua se atraen más fácilmente por la carga negativa, podría indicar que el agua atrae más fácilmente a partículas de suelo que no fueron quemadas, facilitando el ingreso de agua, causando que se alcancen más rápidamente los límites. Este fenómeno se expone con mayor detalle en el capítulo 5.4).

5.2.4 Análisis granulométrico

En estos ensayos granulométricos se empleó tamizado por mallas y ensayo de hidrómetro.

Es importante mencionar que los ensayos de determinación del tamaño de partículas finas mediante hidrómetro, se realizaron de dos formas. La primera, fue empleando

defloculante y la segunda, agua, para mirar el efecto químico en la desagregación de partículas (ver Figura 5.4).

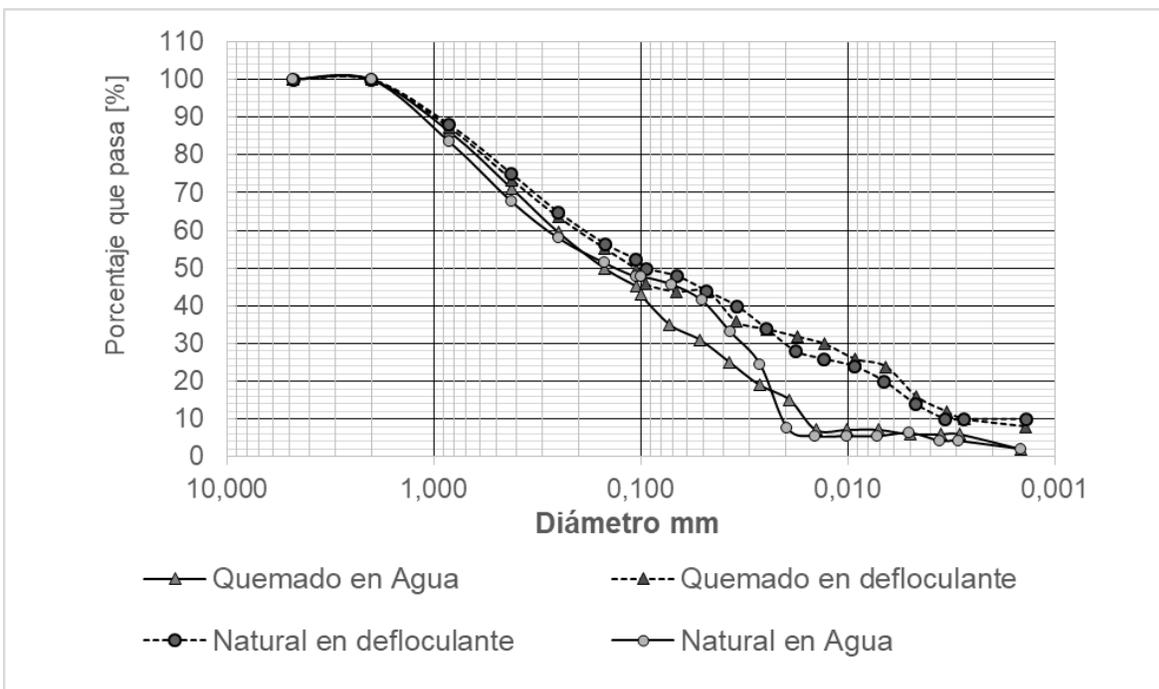


Figura 5.4: Curvas granulométricas tamizado e hidrómetro (en agua y en defloculante)

Basados en la Figura 5.4, es posible identificar que los dos materiales desagregan de forma similar al utilizar el defloculante, sin embargo, para el ensayo elaborado empleando agua, se identifican diferencias, las cuales son más marcadas para el suelo quemado en la textura de limo.

En la Figura 5.5 se presentan los resultados de la gradación, al emplear defloculante como medio de dispersión.

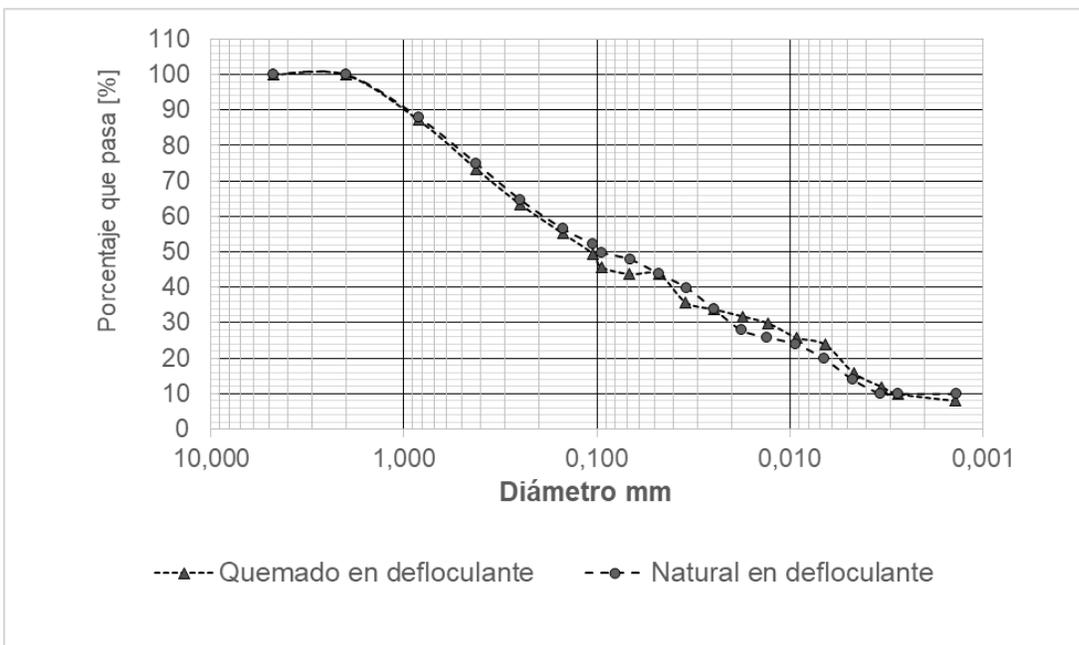


Figura 5.5: Curvas granulométricas tamizado e hidrómetro (En defloculante)

En los ensayos realizados empleando agua, se logra identificar que existe un porcentaje menor de partículas con tamaños entre 0,025 mm y 0,1mm en la muestra natural, por lo que se puede concluir que, para este caso en particular, la exposición del suelo a las altas temperaturas causó agregación de las partículas, (Figura 5.6). Resultados que concuerdan con lo obtenido en los ensayos de microscopía y que también fue reportado en otros estudios, (Patiño, 2014) aunque en ese caso las pruebas se realizaron sobre un suelo de depósito.

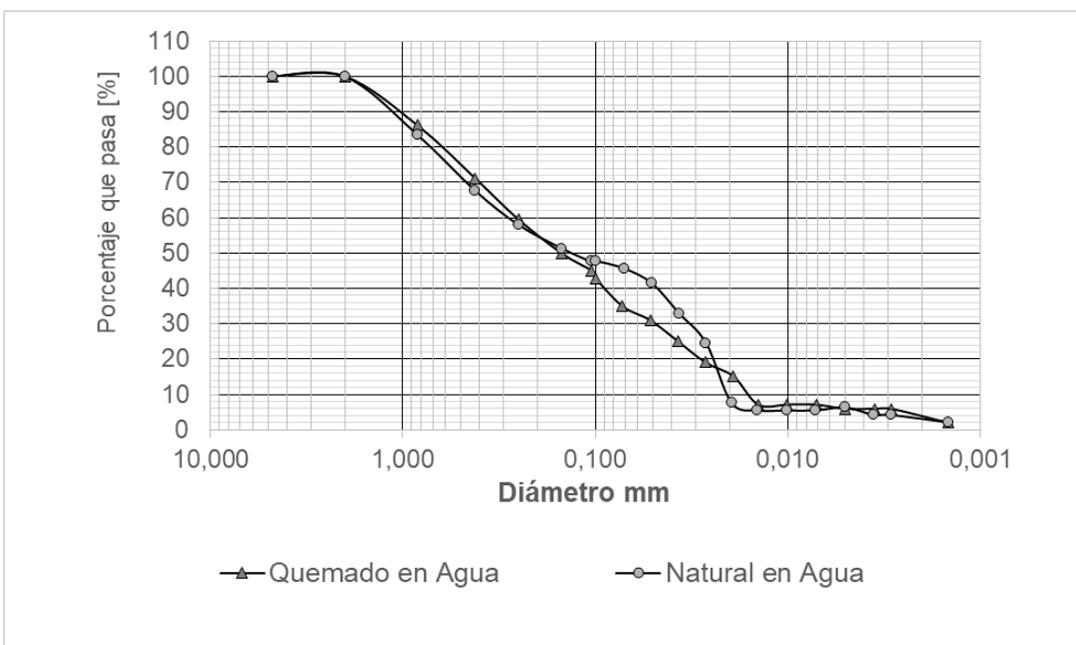


Figura 5.6: Curvas granulométricas tamizado e hidrómetro (En agua)

5.2.5 Clasificación USCS

Pese a que se logra evidenciar en las curvas granulométricas, que el suelo sometido al incendio controlado, sufre agregaciones y que estas modifican los contenidos de arenas y limos, tal como se presenta en la Tabla 5-6, dichas modificaciones, no son lo suficientemente grandes para causar una clasificación diferente del material, la cual corresponde a SC-SM para ambas muestras (quemada y natural).

5.2.6 Clasificación MCT

La clasificación MCT permite establecer no solo el tamaño y la distribución de las partículas, sino que esta permite entender algo del comportamiento del suelo. Los resultados calculados para la clasificación se muestran en la Tabla 5-7

Tabla 5-7 Resultados clasificación MCT

Muestra	Diámetro inicial promedio (mm)	Diámetro final promedio(mm)	CT	Penetración Promedio	Clasificación
Naturales	21,14	20,10	1,04	4	NA'/NG'-NS'
	20,99	20,17	0,82	3	NA'/NG'-NS'
	21,21	20,11	1,10	3	NA'/NG'-NS'
Quemado	21,02	19,60	1,40	4	NA'/NG'-NS'
	21,27	19,85	1,40	3	NA'/NG'-NS'
	21,00	19,59	1,40	4	NA'/NG'-NS'

Según estos resultados, la clasificación MCT no cambia y corresponde a Saprolitos arcillosos, provenientes de rocas sedimentarias o cristalinas, que suelen presentar comportamientos plásticos y en algunos casos expansivos (Nogami, 1995).

Es importante resaltar que, aunque no se presente cambios en la clasificación, lo que concuerda con los ensayos de clasificación USCS, si se presentó un aumento considerable en la contracción de las muestras, luego de ser sometidas a incendios.

5.2.7 Contracción MCT

De las pruebas realizadas, se pudo establecer que las muestras que estuvieron sometidas al efecto del incendio, aumentaron su contracción en promedio un 52%,

respecto a las lecturas del suelo natural. El fenómeno de contracción excesiva puede generar que el suelo presente grietas, que son desfavorables ante la presencia de agua y debilitan la masa de suelo ante las solicitaciones a que está expuesto.

Estas reducciones en la resistencia se ven claramente en los resultados de los ensayos de corte directo realizados, donde las muestras sometidas al incendio siempre arrojaron valores de capacidad por debajo de los obtenidos en la muestra patrón.

Otro resultado importante, relacionado con el agrietamiento por contracción es la reducción de la succión matricial, debido al aumento de la relación de vacíos por presencia de grietas.

5.2.8 Relación de Vacíos

Cabe indicar que aunque los resultados de ensayo de relación de vacíos, no muestren un incremento sustancial, en dicha relación, entre las muestras quemadas y las que no lo fueron, esto se puede deber al hecho, de que los ensayos se hubieran practicado en muestras de suelos, donde no existían agrietamientos considerables, pues el resultado de la microscopia evidenció la existencia de agregaciones y agrietamientos importantes en las muestras.

Por otro lado, analizando los resultados obtenidos, encontramos que el valor de 1,00 en condición natural y el valor de 1,07 luego de someterse al incendio se encuentran en el límite superior de los esperados para un suelo con clasificación SM. Pues en estos la relación de vacíos típica esta entre 0,33 y 1,0 (Das, 2008).

5.3 Caracterización mineralógica y estructural

Con el fin de realizar una caracterización mineralógica y estructural, se acudió a la realización de pruebas rutinarias para determinación de dichas características, los cuales corresponden a difracción de rayos X y microscopio electrónico de barrido.

5.3.1 Difracción de Rayos X

El ensayo de difracción de rayos X, tiene como fin determinar los minerales presentes en las muestras obtenidas en campo, lo que permite validar si algún mineral sufrió cambios producto de la exposición al calor. En las Figura 5.7 y Figura 5.8 se presentan los difractorgramas obtenidos para las muestras naturales y quemadas.

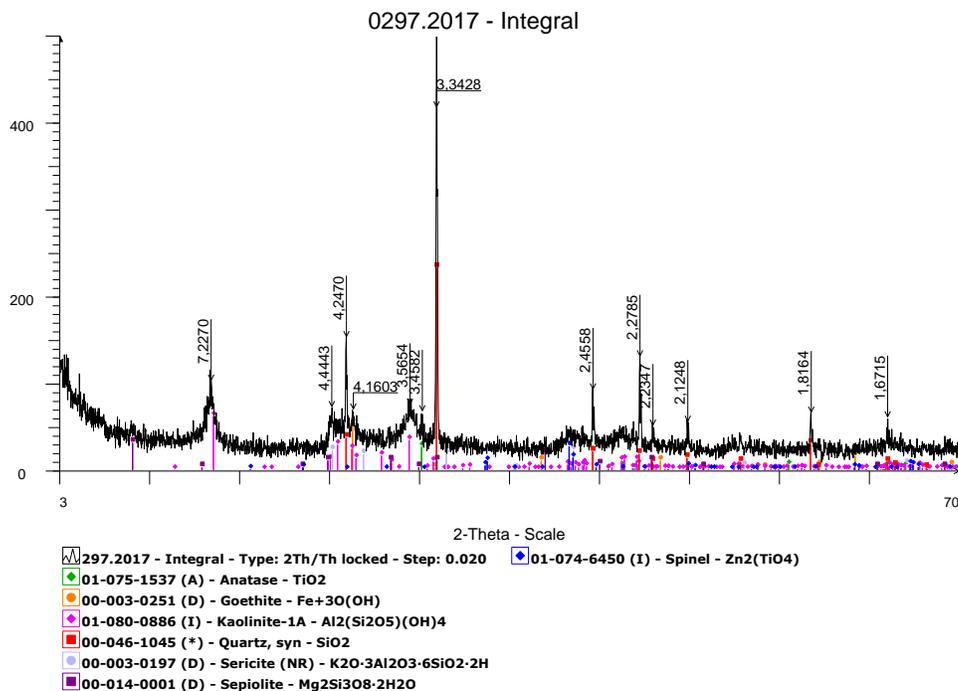


Figura 5.7: Difractograma de la muestra Natural

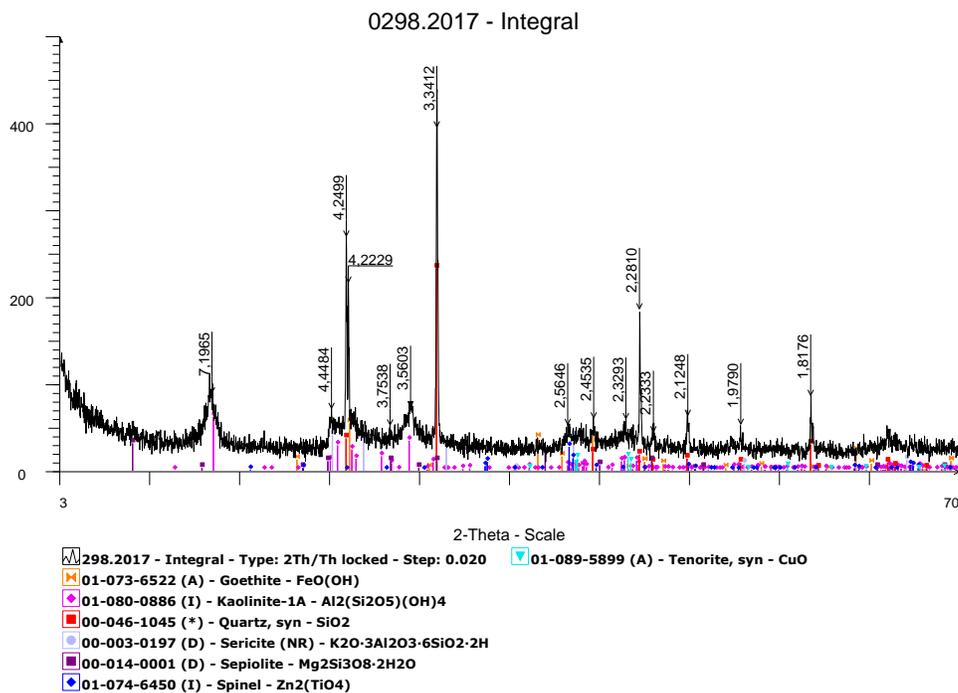


Figura 5.8: Difractograma de la muestra Quemada

Basado en los difractogramas mostrados, se puede concluir que las muestras presentan una composición química bastante similar pues en ambos suelos se obtuvo Goetita , Kaolinita , Cuarzo, Sericita y Sepiolita .

La única variación que se logró identificar fue que en la muestra patrón existía un mineral Anatase (TiO_2) y luego de que la muestra fuera sometida a ignición, varió a $Zn_2(TiO_4)$, donde probablemente el Zn estaba disperso en el suelo.

Basados en el estudio realizado por la universidad nacional sobre el flujo de lodos, sabemos que se pueden generar cambios en la mineralogía debidos a la exposición al calor, pero estos no fueron significativos en este caso.

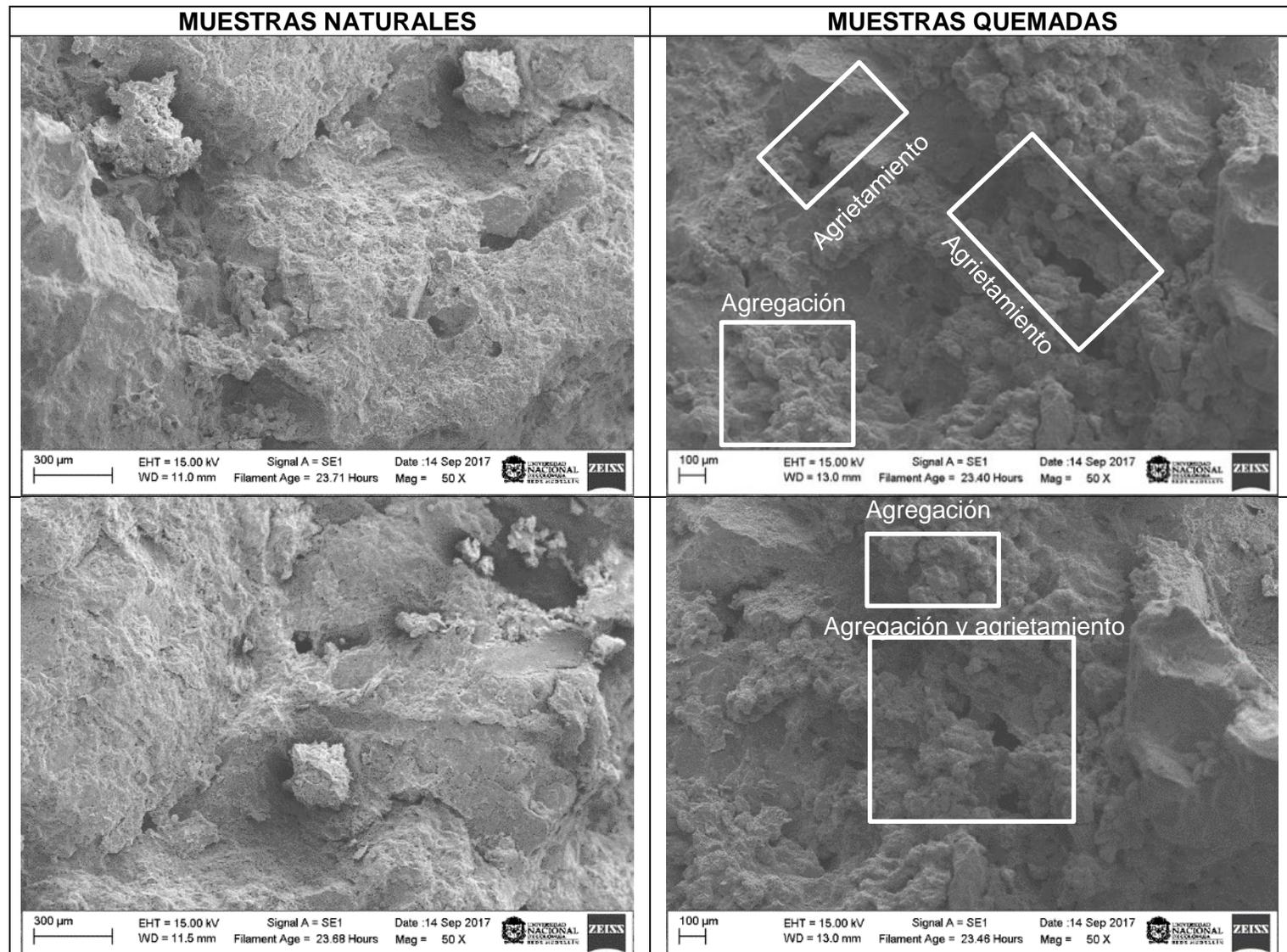
5.3.2 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

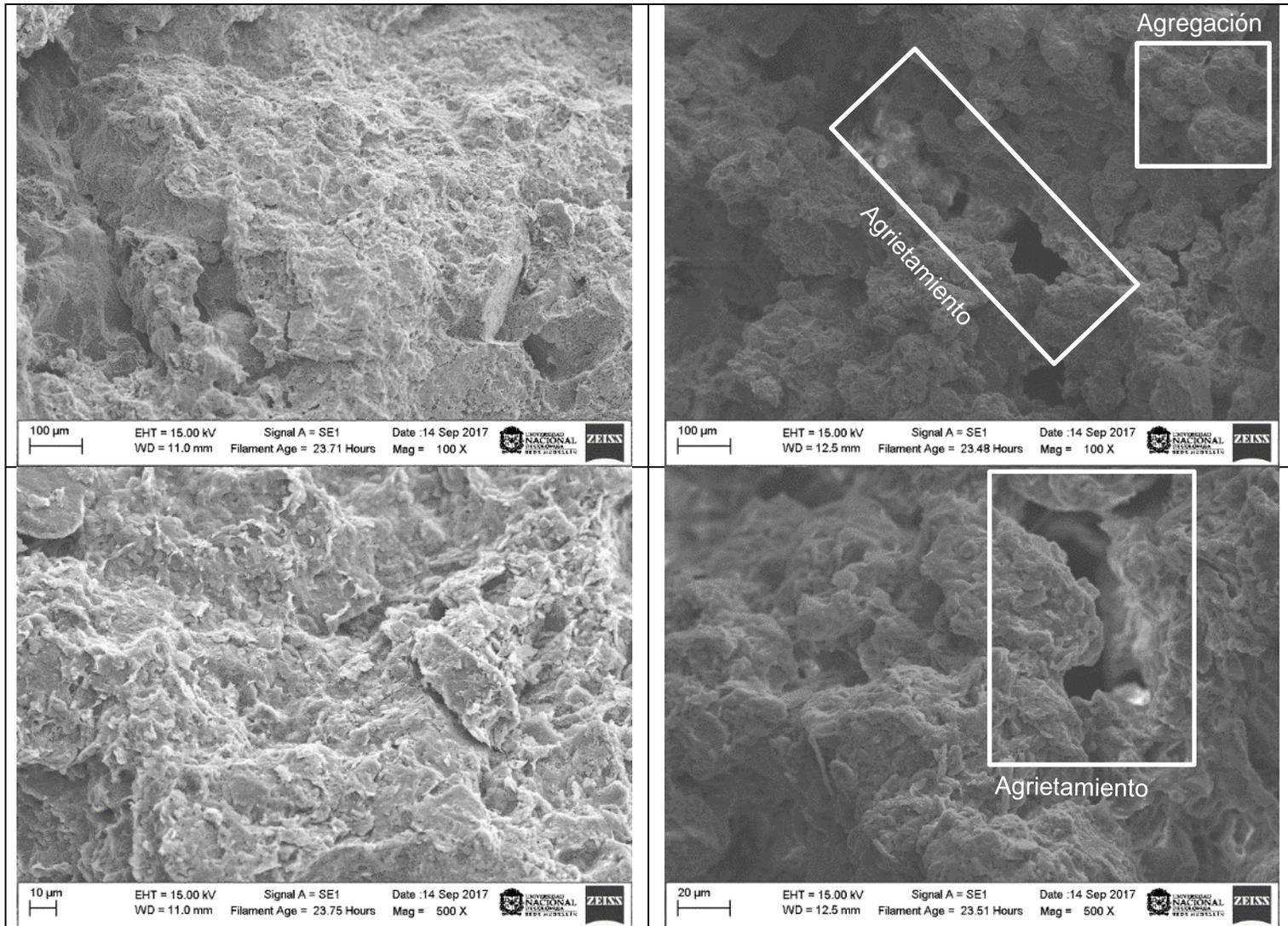
Para entender los cambios en la microestructura del suelo, luego de ser sometido al efecto de las altas temperaturas, se tomaron fotografías empleando un microscopio electrónico de barrido (SEM). Estas fotografías se realizaron, tanto en las muestras naturales, como en las sometidas al efecto de los incendios. En la Tabla 5-8 se presentan las fotografías sobre el suelo natural y el sometido a incendios.

En estas fotografías es posible validar que existen cambios significativos en la estructura del suelo quemado. Pues tal como se identificó en las clasificaciones granulométricas, se observan agregaciones y grietas las cuales se identifican claramente en las fotografías aumentadas a 50X 100X y 500X.

Las agregaciones mencionadas se observan claramente como grumos de material de formas redondeadas, en las muestras quemadas, formas que se identifican claramente en las muestras a 100X, mientras que en las fotografías a 500X, se observan las grietas, las cuales, permiten el ingreso del agua y provocan planos, que facilitan la falla durante la aplicación de cargas, y adicionalmente cambios sustanciales en la succión matricial. En las fotografías también se aprecia un material de mayor tamaño de poro

Tabla 5-8 Imágenes de la muestra Natural y sometida a incendios a diferentes niveles de aumento.





5.4 Caracterización química

La caracterización química ayuda a establecer la presencia de algunos elementos de muestras tanto natural como en la sometida a altas temperaturas. (Ver Tabla 5-9)

Tabla 5-9: Composición química de las muestras analizadas.

	NATURAL	QUEMADA
pH (H ₂ O)	4,8	4,7
pH (KCL)	3,2	3,3
M.O. [%]	10,7	10,3
CICE	0,6	0,8
Ca [meq/100 g suelo]	0,37	0,46
Mg [meq/100 g suelo]	0,22	0,27
K [meq/100 g suelo]	0,03	0,04
Fe [ppm]	39	153
Mn [ppm]	7	12
Cu [ppm]	1	1
Zn [ppm]	1	1
B [ppm]	0,1	0,1

Inicialmente es de resaltar que existen dos cambios importantes entre el suelo quemado y el suelo natural (Ver en la Tabla 5-9). Los cuales corresponden al contenido de hierro, el cual aumento de 39 partes por millón a 153 partes por millón y el contenido de Mn de 7 partes por millo a 12 partes por millón.

Típicamente los iones de hierro y magnesio pueden estar presentes en el agua del suelo, y debido al proceso de cristalización y precipitación causados por el incendio controlado, dichos elementos quedan en la masa de suelo. Para que se produzca cristalización de sulfato ferroso basta con evaporar la solución de agua aplicando temperaturas de hasta 100 C° durante 1 hora, las cuales fueron alcanzadas en el ensayo (Zabala, 2010).

Estos iones de hierro y magnesio presentan, usualmente, cargas positivas, las cuales pueden ser las autoras del incremento en el límite líquido, pues el aumento en el contenido de estos iones, causaría una carga predominantemente positiva en la superficie lo que podría influir en su interacción con el agua.

Otro aspecto importante a mencionar es que al calcular el punto de carga cero de ambas muestras, PCZ (natural y quemada), la diferencia entre el pH en agua de la muestra quemada respecto a su punto de carga cero, es menor que la diferencia entre el pH en agua del suelo natural y su punto de carga cero, ya que las partículas tienden a flocular más en medios más cercanos al punto de carga cero (siempre que no sean medios más alcalinos). Implica que las partículas del suelo quemado se agregan más, que las del suelo natural (Camapum, 2015), resultado que concuerda con lo evidenciado en los ensayos de hidrómetro.

Los pequeños cambios que se observan en los contenidos de Ca, Mg y K al compararlos con los resultados del ensayo de DRX, se identifica que pueden ser ocasionados por variaciones usuales en los contenidos de minerales existentes en las muestras, un ejemplo sería la sericita, mineral que fue encontrado en ambas muestras la cual contiene potasio (k) o el magnesio en el mineral de sepiolita que se encontró en ambas muestras.

Respecto al resultado del ensayo de pH, para incendios de baja intensidad, donde la combustión de la materia orgánica es muy baja como en este caso y mucho más si la capa orgánica es extraída, los cambios en el pH son insignificantes (Owensby y Wyrill, 1973). Se ha observado en algunos casos que se puede producir una disminución del pH de algunas décimas tal como sucedió (Giovanini, 1989, 1990; Sertsu, 1978). Este hecho se atribuye a una disminución del poder amortiguador del suelo como consecuencia de la deshidratación de los coloides (Coles & Morrison, 1930).

Otro factor que pudo afectar al pH es que usualmente los cambios se producen por el contacto del suelo con las cenizas (Rosero y Osorio, 2013) y ya que en este ensayo se retiraron los primeros 10 cm luego del incendio, el suelo que queda no presento contacto directo y por consiguiente no presenta valores muy significativos.

En relación al contenido de materia orgánica el valor observado tampoco sufrió una variación sustancial, pero el leve descenso en este se puede deber a la combustión lo que disminuye el contenido de materia orgánica (Martinez ,1991), combustión que pudo presentarse en algunas raíces.

Las variaciones con relación a la Capacidad de Intercambio Catiónico van a depender de la intensidad del fuego y del tipo de suelo. La alteración de la materia orgánica tiene lugar a temperaturas comprendidas entre 100-250°C, observándose una reducción del 20% de la capacidad de intercambio catiónico en suelos en los que esta propiedad está determinada fundamentalmente por el humus (Gonzalez, 1998). Sin embargo, los fuegos de intensidad débil parecen tener poco efecto en la C.I.C. En algunos casos, si la intensidad del fuego ha sido baja, han encontrado aumentos de la capacidad de intercambio, tal como ocurrió en esta investigación, efecto que han relacionado posiblemente con la liberación de cargas procedentes de complejos órgano-minerales (Gimeno, 1987).

Finalmente pese a que se registran incrementos en algunos elementos, tal como lo indican algunos autores, estos no podrán ser retenidos y son más fácilmente lixiviados hacia horizontes profundos o arrastrados por el agua durante las primeras lluvias (Solera, 1999).

5.5 Caracterización mecánica

A continuación se presentan los resultados de las pruebas mecánicas realizadas sobre las muestras naturales y las sometidas al efecto de los incendios. Adicionalmente, se presentan los análisis y las comparaciones entre ambos resultados.

5.5.1 Curva característica de succión

En este capítulo se presentarán tanto los resultados de la succión matricial, como de la succión total estimada para ambas muestras de suelo.

- **Succión matricial:**

La succión matricial muestra que en el suelo sometido a ignición en los microporos y los poros de tamaño medio existe un leve incremento en la succión. Lo que no sucede en la zona de los macroporos, pues se presenta una disminución en la succión, situación que puede ser explicada por el agrietamiento causado por la contracción y que se verificó durante el ensayo MCT.

Dicho resultado es muy significativo, pues se podría afirmar que el agrietamiento disminuye el aporte de la succión en la macro estructura lo que causa también una menor resistencia del suelo. (Figura 5.9).

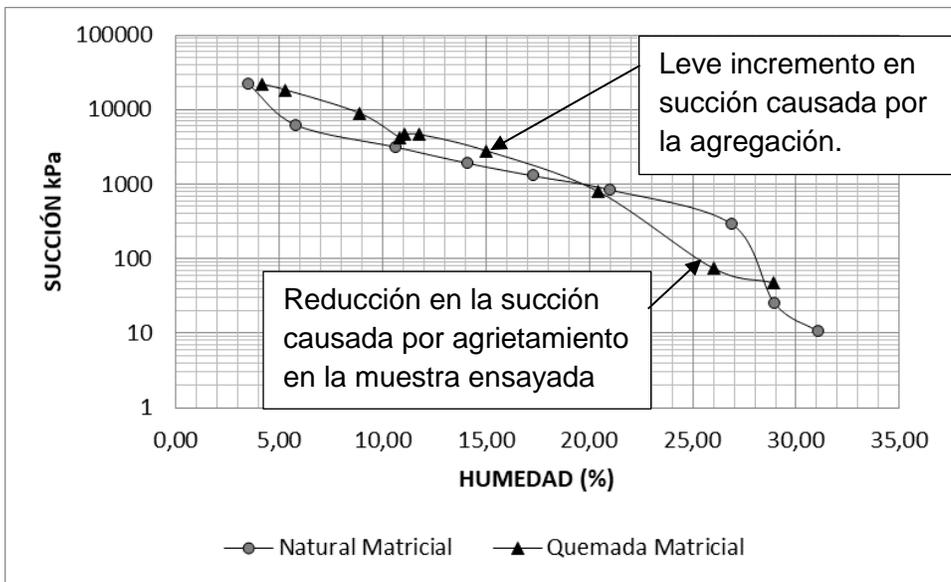


Figura 5.9: Curvas características de las muestras analizadas (Succión vs humedad).

- **Succión Total (matricial +osmótica)**

Durante las pruebas, fue posible establecer que la curva de succión total, asociada a la muestra de suelo quemado, siempre se encuentra por encima de la curva de succión

total de la muestra natural. El aumento es considerablemente mayor para humedades mayores a 15% y es causado por los cambios en la química del suelo.

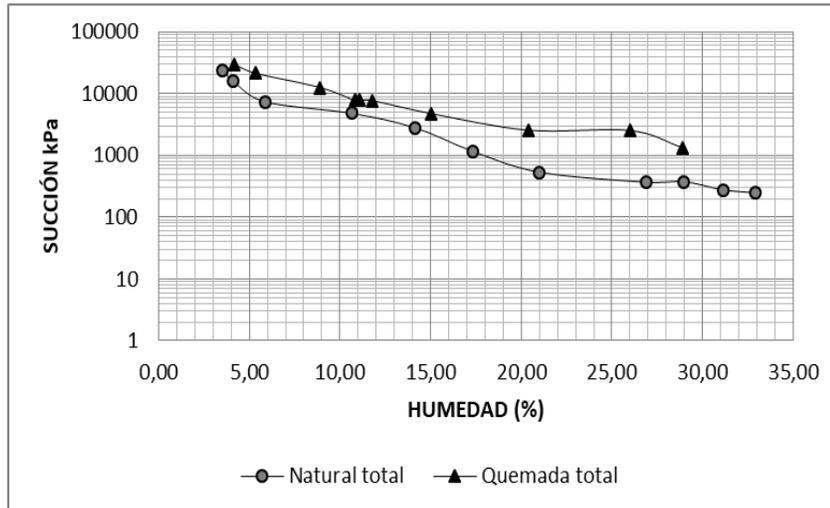


Figura 5.10: Curvas características de las muestras analizadas (Succión vs humedad).

Respecto a los macro y microporos se concluye que el resultado obtenido concuerda con lo mencionado por algunos autores (Rosero, 2013.y Solera, 1999). Pues estos indican que la exposición del suelo al fuego suele destruir parte de la estructura de los macroporos y microporos, aumento la succión, pero es importante resaltar que aunque dichos autores señalan que existe agregación tal como ocurrió en este estudio, estos no mencionan los fenómenos particulares que pueden causarse por los agrietamientos los cuales se convierten en caminos preferenciales para el agua al interior de la masa de suelo. Por último en la Figura 5.11 se muestra el claro el efecto del aumento en los vacíos global en la muestra quemada, ahora dicho efecto es mucho más marcado en los intra-agregados (microporos) que en los inter-agregados (macroporos).

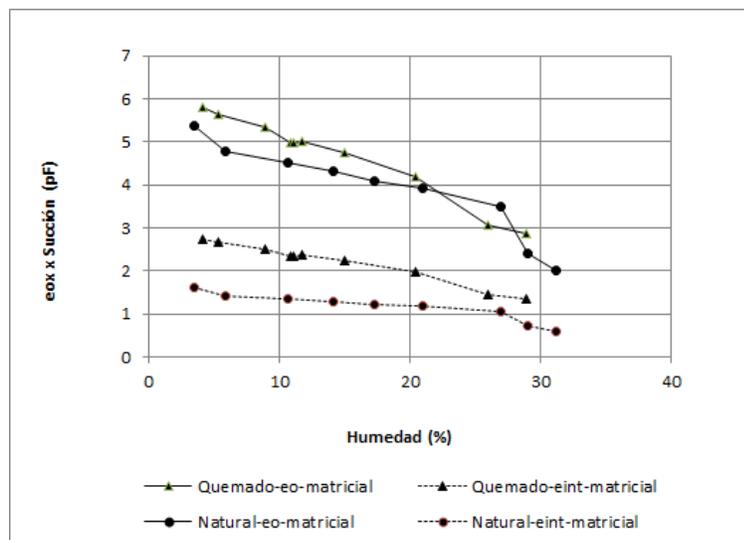


Figura 5.11: Variación de la relación de macroporos y microporos respecto a la relación de vacíos.

5.5.2 Corte directo Consolidado Drenado (CD)

Las pruebas de corte directo se realizaron completamente saturadas, tanto para las muestras naturales, como para las sometidas a los incendios.

Empleando los valores de carga residual se grafica en el espacio esfuerzo cortante vs carga axial las resistencias obtenidas y se estima una recta que se aproxima a los resultados obtenidos (ver Figura 5.12).

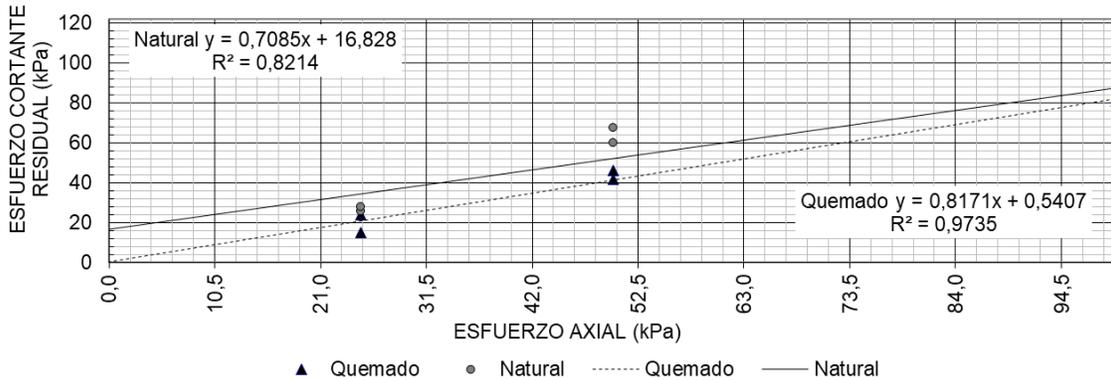


Figura 5.12: Esfuerzo axial vs esfuerzo cortante de las muestras estudiadas.

Para la elaboración de esta prueba se realizaron seis puntos (Las gráficas tensión deformación se incluyen en los anexos) para el suelo natural y cinco para el suelo quemado. Y se obtuvo como resultado que para esfuerzos verticales entre 0,0 y 73,5 kPa, la resistencia al corte del suelo natural es mayor a la del suelo sometido a incendios, lo que es un resultado esperado, pues el agrietamiento causado por la contracción causa reducción en la resistencia al corte.

A continuación se presentan los valores obtenidos de cohesión y fricción, residuales.

Tabla 5-10: Parámetros de resistencia al corte

	COHESIÓN [kPa]	FRICCIÓN [°]
Parámetros residuales muestra natural	16,8	35
Parámetros residuales muestra quemada	0,5	39

De la Tabla 5-10 se puede concluir que los parámetros geotécnicos sufren una serie de cambios importantes, pues los suelos, luego de someterse al efecto del incendio, presentan pérdida de la cohesión, situación que obedece a la formación de agregaciones y a los agrietamientos, pues típicamente a mayor tamaño de grano se observan menores cohesiones, pero también, se presentan en los suelos quemados mayores ángulos de fricción, cambios que se deben a la agregación, pues típicamente a mayor tamaño de grano mayor fricción.

Por otro lado, el suelo en condición natural presenta un ángulo de fricción coherente con su clasificación, pues según la literatura dicho valor, típicamente varía entre 32° y 35°, (Association Swiss Road and traffic, 2007). Lo que no sucede con el suelo sometido al incendio el cual presenta un valor ligeramente más alto.

Respecto a los valores de cohesión según la clasificación se esperaba que este variara entre 5kPa y 22kPa, lo que es coherente para el suelo en condición natural, pero que difiere de lo obtenido para la muestra sometida a incendio.

5.5.3 Análisis de estabilidad

Con el fin de validar el comportamiento del suelo localizado en un talud en campo, debido al cambio que sufren los parámetros de resistencia del suelo, se realiza un análisis de estabilidad con diferentes pendientes intentando identificar cuáles serían los más propensos a erodarse.

La evaluación de la estabilidad, se realizó mediante la metodología de análisis de equilibrio límite, con ayuda del programa SLIDE, desarrollado por la firma Rocscience, el cual, emplea el método básico de las dovelas y el equilibrio de fuerzas y momentos, con los que se pueden determinar las variaciones de los factores de seguridad.

Como criterio de estabilidad, en el análisis de equilibrio límite se siguió la normativa vigente, NSR-10, la cual establece para sistemas permanentes un factor de seguridad (F.S.) no inferior a 1,50 en condiciones estáticas y no inferior a 1,1 para condiciones pseudoestáticas. Valores se toman de la tabla H.6.9-1 de la NSR 10 norma mencionada.

- Análisis de estabilidad en condición estática

Empleando estos parámetros geotécnicos se realizan análisis de estabilidad estáticos con el software Slide V.6, aplicando las metodologías de Bishop.

Tabla 5-11: Factores de estabilidad obtenidos para suelos naturales y quemados.

MUESTRA	Parámetros residuales		
	NATURAL	QUEMADA SIN GRIETAS	QUEMADA CON GRIETAS
Talud 20°	2,54	2,37	2,36

Talud 30°	1,80	1,59	1,56
Talud 40°	1,39	1,13	1,09
Talud 50°	1,10	0,84	0,79

Con los resultados presentados en la Tabla 5-11 es posible concluir que independiente de la pendiente del talud, siempre que se evalúa la estabilidad, empleando los parámetros de suelos sometidos a altas temperaturas, se obtienen menores factores de seguridad, que empleando la condición natural. Por otro lado, se puede concluir que para taludes con pendientes mayores a 30 grados se obtienen diferencias considerables del factor de seguridad entre los suelos naturales y los suelos quemados. Sin contar con que el Factor de seguridad alcanzado por la muestra quemada no cumple con los criterios de estabilidad de taludes que obliga la norma FS:1,5

En la Figura 5.13 a la Figura 5.14 se presentan los análisis realizados para los taludes, con pendientes de 50° haciendo uso de los parámetros estimados para el suelo en condición natural y los sometidos a incendio.

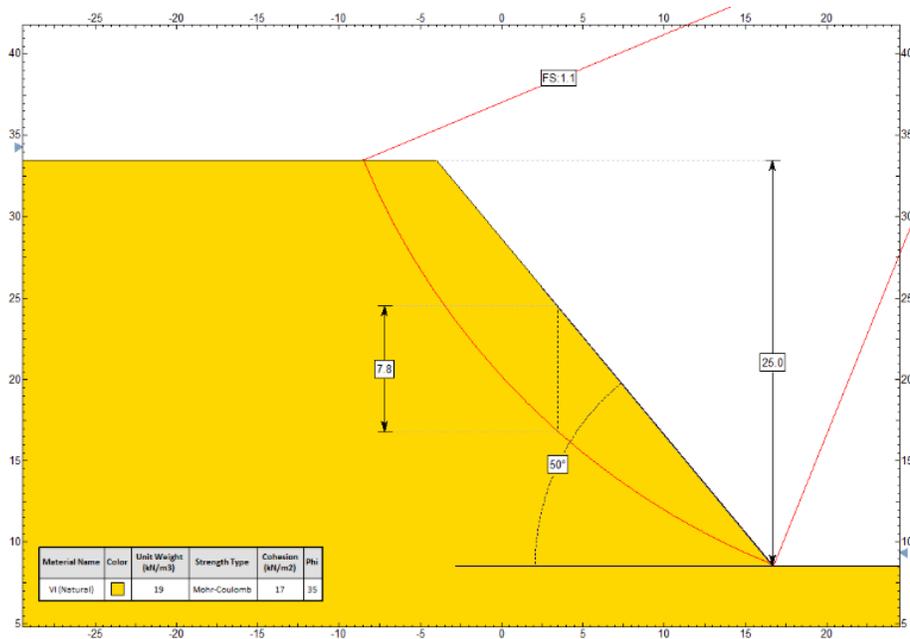


Figura 5.13: Análisis de estabilidad en condiciones estáticas del talud con los parámetros del suelo natural.

En las evaluaciones del talud con los parámetros del suelo natural, se identifica que la superficie de falla crítica tiende a ser profunda y presenta valores de FS:1,1. Concluyendo de esto que un talud con la geometría presentada, tiende a ser estable aunque este no cumpla con el mínimo establecido en la norma Colombiana Sismo-resistente NSR 10.

A continuación se presentan en la Figura 5.14 la evaluación de la estabilidad para el suelo con parámetros luego de ser sometido a ignición.

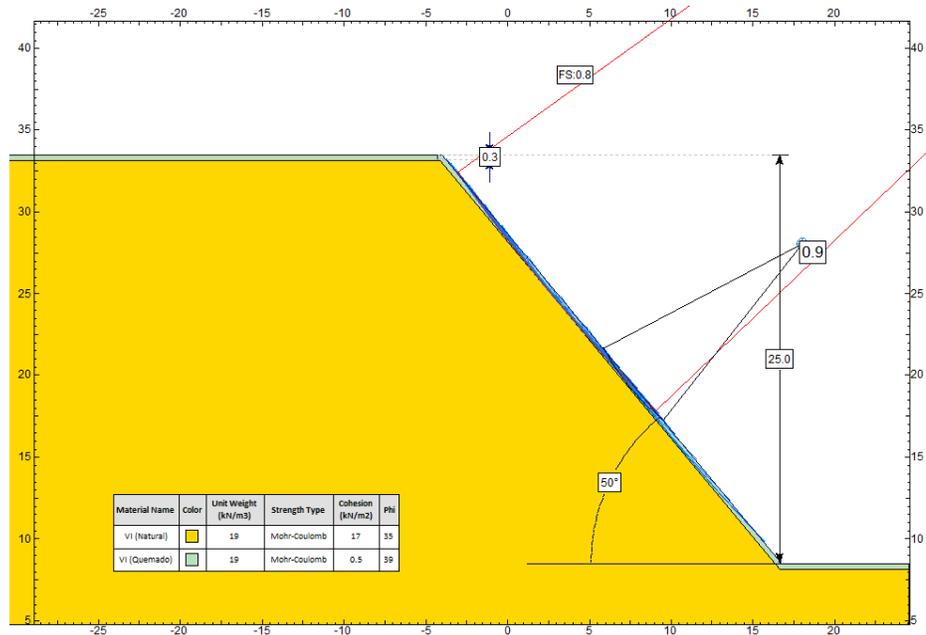


Figura 5.14: Análisis de estabilidad en condiciones estáticas del talud con los parámetros del suelo quemado.

En la Figura 5.14 se logró evidenciar que empleando los parámetros del suelo quemado, se presentan superficies de falla muy próximas al nivel del terreno, las cuales responden típicamente a como se presentaría un fenómeno de erosión superficial, pues muchas de los círculos de falla están a una distancia de la cara del talud menores a 0,5 m. Finalmente se realiza un análisis incluyendo algunas grietas por desecación en el modelo las cuales están llenas de agua y se obtienen factores de seguridad ligeramente más bajos a los obtenidos para el análisis sin grietas (ver Figura 5.15).

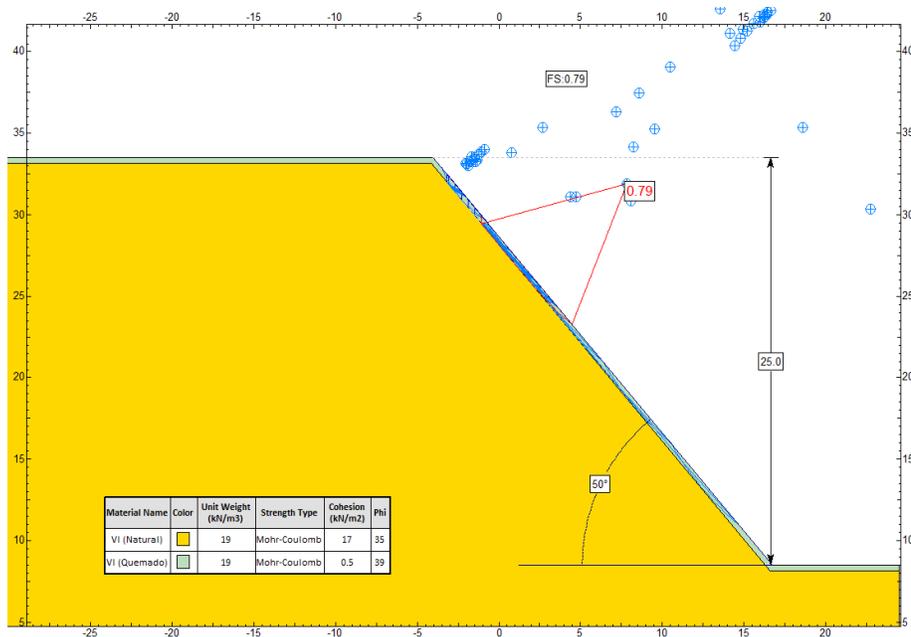


Figura 5.15: Análisis de estabilidad en condiciones estáticas del talud con los parámetros del suelo quemado e incluyendo grietas por desecación.

▪ Análisis de estabilidad en condición Seudoestática

Ya que estos taludes posiblemente estarán expuestos a sismos es importante validar si los sismos influirían negativamente en la erodabilidad y el factor de seguridad de las primeras capas de suelo.

Para el análisis pseudoestático, se utilizó el coeficiente de aceleración horizontal pico efectiva, que corresponde al municipio de Bello, según el apéndice A-4 de la NSR - 10, para un período de retorno de 475 años, y se aplicó el criterio para la determinación del coeficiente sísmico de diseño (KST) presentado en el capítulo H.5.2.5 del mismo código, donde se asume el material bajo un análisis de onda bidimensional”. A continuación, se presenta la ecuación a considerar.

$$\frac{K_{ST}}{a_{m\acute{a}x}} = 0,50$$

Dónde:

KST: Coeficiente sísmico de diseño para análisis pseudoestático.

Amáx: Aceleración máxima del terreno, Aa*Fa*I.

Aa: Coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva = 0,15.

Fa: Coeficiente de ampliación del suelo para la zona de períodos cortos del espectro, para suelos tipo D, (1,5).

I: Coeficiente de importancia=1,0. (Asumiendo que en algún momento se construiría una estructura de ocupación normal que pudiera ser afectada por la ladera).

Con base en lo anterior, el máximo coeficiente sísmico horizontal para el diseño corresponde a un Kst de 0,11 g; por otro lado, la aceleración vertical considerada corresponde al 50% de la horizontal, es decir 0,06 g.

Empleando estos parámetros geotécnicos se realizan análisis de estabilidad seudo estáticos con el software Slide V.6, aplicando las metodologías de Bishop.

Tabla 5-12: Factores de estabilidad obtenidos para suelos naturales y quemados condición seudo estática.

MUESTRA	Parámetros residuales		
	NATURAL	QUEMADA SIN GRIETAS	QUEMADA CON GRIETAS

Talud 20°	1,91	1,78	1,77
Talud 30°	1,44	1,25	1,23
Talud 40°	1,2	0,92	0,88
Talud 50°	0,9	0,66	0,64

Con los resultados presentados en la Tabla 5-11, es posible concluir que: al igual que, en el análisis en condición estática, siempre que se evalúa la estabilidad del talud empleando los parámetros de suelos quemados, se obtienen menores factores de seguridad que empleando la condición natural y que para taludes con pendientes mayores a 30 grados el factor de seguridad alcanzado por la muestra quemada, no cumple con los criterios de estabilidad de taludes que obliga la norma FS:1,1

En la Figura 5.16, Figura 5.17 y Figura 5.18 se presentan los análisis realizados para los taludes con pendientes de 50° donde se observa claramente el fenómeno de erosión superficial en los suelos quemados.

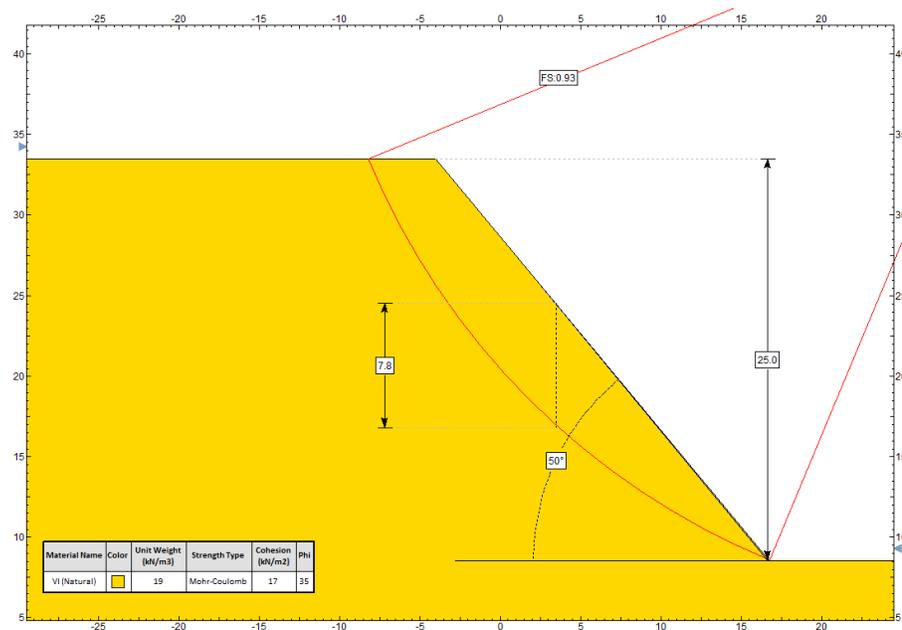


Figura 5.16: Análisis de estabilidad en condiciones seudoestáticas del talud con los parámetros del suelo natural.

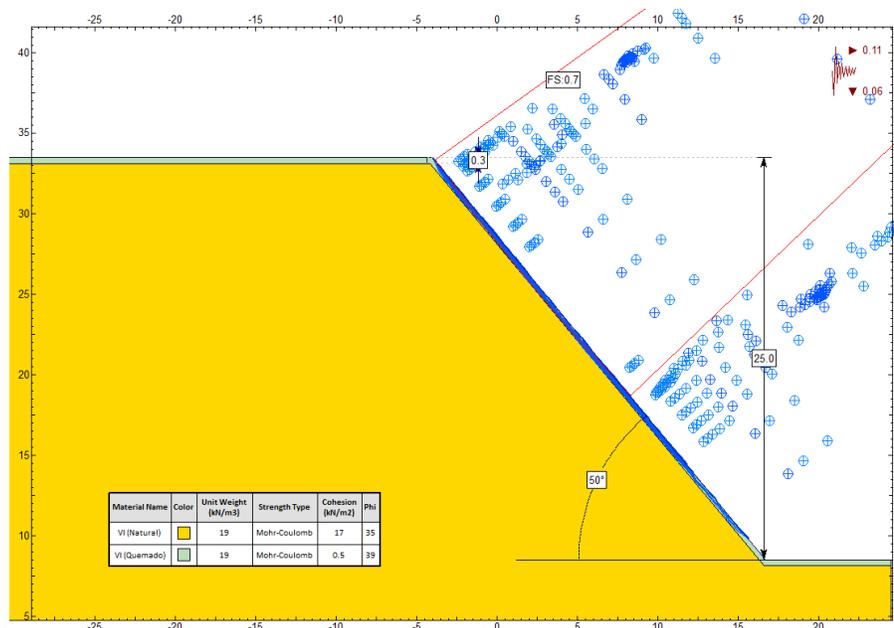


Figura 5.17: Análisis de estabilidad en condiciones seudoestáticas del talud con los parámetros del suelo quemado.

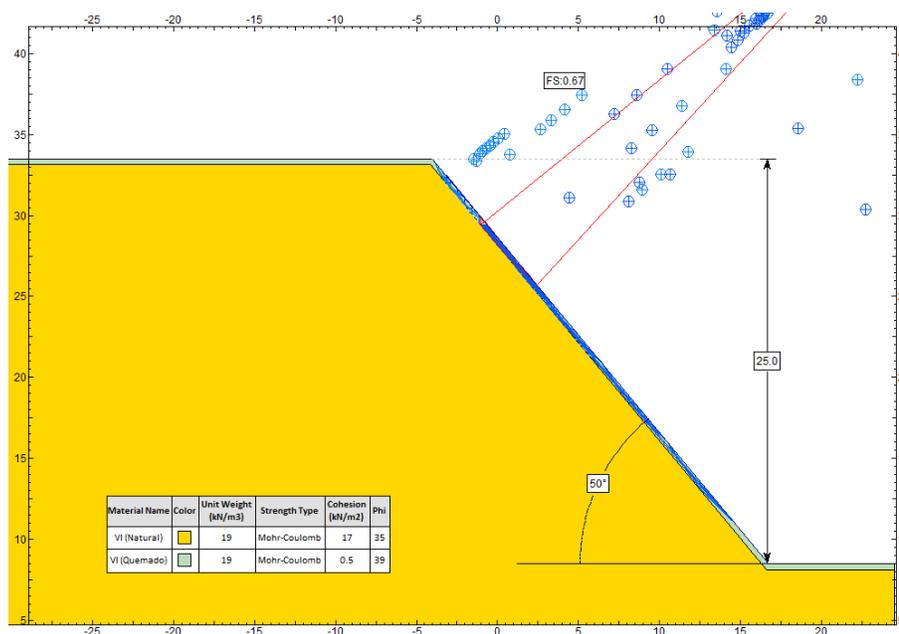


Figura 5.18: Análisis de estabilidad en condiciones seudoestáticas del talud con los parámetros del suelo quemado y grietas.

Basados en los análisis de estabilidad tanto en condición estática como seudo estática se concluye que, se pueden generar fenómenos de erosión superficial debido a la exposición del suelo a un incendio superficial. Más cuando los suelos cohesivos tienen superficies de falla más profundas que para aquellos taludes conformados por materiales granulares.

5.5.4 Pinhole test

El primer ensayo para medir el potencial erosivo corresponde al Pinhole, que arrojó resultados de mayor susceptibilidad a la erosión para los suelos sometidos al proceso de ignición. (Ver Figura 5.19).

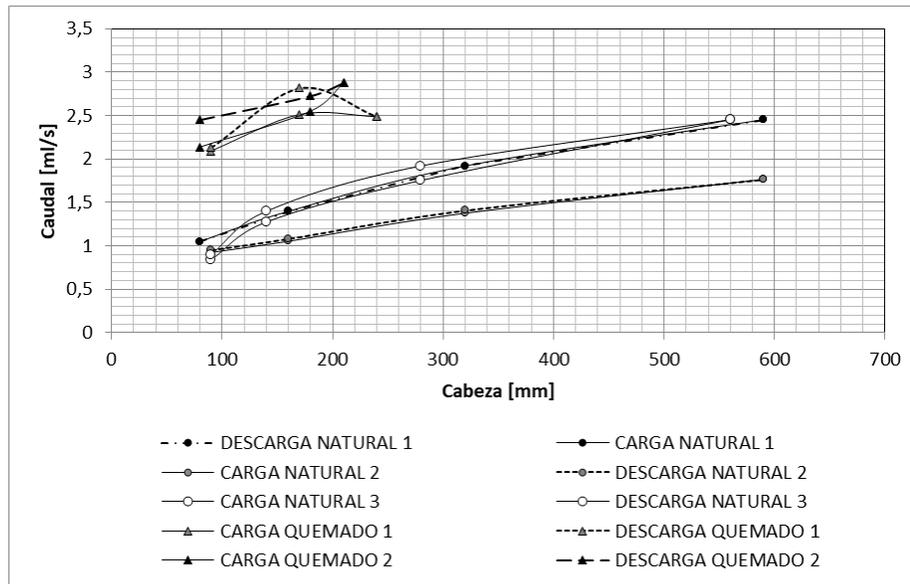


Figura 5.19: Resultados de los ensayos Pinhole para ambas muestras.

Durante las pruebas realizadas sobre los suelos naturales, estos presentaron comportamientos no susceptibles a erosión interna, pues ninguna de las pruebas realizadas en estos, mostró taponamientos o aberturas sustanciales del agujero. Las pruebas sobre suelos naturales mostraron que los caudales variaron entre 0,8ml/s y 2,45 ml/s para diferentes cabezas de presión. El comportamiento del caudal y la presión en ambas pruebas es aproximadamente lineal tanto durante la carga como la descarga. Con el fin de comparar posteriormente con los resultados de los suelos quemados se calcula que la pendiente de ambas rectas varía de 0,0016 a 0,0027

Respecto a los suelos quemados no es posible identificar un comportamiento uniforme por lo que ambas pruebas son analizadas de forma independiente.

Durante los ensayos en suelo quemado se presentaron comportamientos más atípicos, respecto a lo obtenidos para las muestras de suelo en condición natural. Se observa que únicamente durante el proceso de saturación de la muestra el tamaño del agujero se vio incrementado probablemente por el arrastre de las partículas, pues la lectura promedio inicial mostró un caudal de 2 ml/s. Posteriormente, al incrementar la carga y realizar los ensayos se encontró que no es posible elevar la cabeza de presión a los 320 mm a los que fueron llevadas las otras pruebas, por lo que se tomó como punto de máxima cabeza de presión 240 ml, último valor durante el cual fue posible mantener la cabeza constante para la toma de datos. Finalmente, durante la descarga se logra identificar un aumento

sustancial del caudal lo que sugiere que se presenta un lavado y arrastre de partículas con incremento del tamaño del orificio inicial.

El incremento del caudal durante los ensayos de Pinhole, pueden ser explicados por la presencia de las fisuras (causadas en el suelo por la desecación del mismo) las cuales al estar sometidos al aumento de la presión y sumado a la disminución en los parámetros de resistencia del suelo, causan que pequeñas partículas del suelo se separan de la masa y produzcan una abertura mayor.

5.5.5 Desagregación

Con el fin de identificar si el ascenso capilar es el causante de los desprendimientos de la masa de suelo, se realizan ensayos de desagregación. Es importante mencionar que para la ejecución de dichas pruebas se requería del tallado de muestras cuadradas las cuales fueron complicadas de elaborar en los suelos sometidos a incendios, pues durante el tallado estas presentaban fracturas frágiles, causando que las muestras no tuvieran las geometrías previstas.

En la Tabla 5-13 se presentan las fotografías con los resultados obtenidos sobre ambas muestras (una natural y una quemada).

Tabla 5-13 Fotografías ensayo de desagregación

	Muestras Naturales	Muestras quemadas
Nivel a 1/3		
Nivel a 2/3		



Las fotografías mostradas corresponden a las primeras muestras sometidas al ensayo de desagregación. En estas, se observa que el suelo sometido a incendios, presenta una desagregación mayor que el suelo natural. Este comportamiento se comienza a observar desde que se alcanza un tercio de la altura del agua, pero, no es posible validar que el suelo se vea afectado de forma importante por el ascenso capilar pues al realizar otras pruebas de este tipo el resultado fue muy similar para lo observado con el suelo natural y el suelo sometido a incendios.

5.5.6 Inderbitzen

El ensayo Inderbitzen corresponde a una prueba directa de erodabilidad, la cual se aplicó tanto a los suelos en condición natural, como a los suelos sometidos a incendios. Durante, este ensayo se logró constatar que los ensayos elaborados sobre muestras de suelos sometidos a incendios son más erodables, que las muestras de suelos en condiciones naturales. Los resultados coinciden con lo esperado, pues concuerda con los resultados obtenidos en las otras pruebas mecánicas realizadas y con los obtenidos en las simulaciones del talud en el software Slide

En este caso, la prueba se realizó con una pendiente de 30° y se tomó la medida del material erodado sin emplear tamices, pues no se quería evaluar el tipo de material erodado, sino cuál de las dos muestras presenta un comportamiento más desfavorable bajo las condiciones simuladas del talud.

Las pruebas se aplican típicamente a diferentes muestras en intervalos de 1 min, 5 min 10 min y 15 min. Para este caso, se realizaron pruebas bajo un intervalo de tiempo de 5 minutos pues para tiempos menores no se observaba una pérdida considerable del material, y para intervalos mayores de tiempo, no era posible calcular el caudal debido al recipiente empleado en la descarga, pues debido a la longitud de los soportes del canal no cabían recipientes más grandes.

Particularmente esta prueba se realizó con un caudal aproximado de 3,2 litros/min para el suelo natural y de 3,0 litros/min, para el suelo sometido al incendio, caudales estimados gracias al volumen del recipiente empleado para recolectar la descarga de agua.



Figura 5.20 Material para ensayo de erodabilidad ensayo Inderbitzen.

Empleando la metodología descrita en el capítulo 4.3.4, se estimó la erosión causada por el flujo de agua en ambas muestras.

Para las dos muestras de suelos sometidos a incendios se obtiene un $E=0,213 \text{ gr/cm}^2$ promedio, mientras que para las dos muestras naturales un valor de $E=0,089 \text{ gr/cm}^2$ promedio, resultado que demuestra la susceptibilidad del suelo quemado a la erosión superficial.

Estos resultados evidencian que el suelo que fue sometido al efecto de las altas temperaturas incremento su erodabilidad en más del doble (aumento de un 130%) respecto a la misma prueba realizada para el suelo natural.

6. Conclusiones y Recomendaciones

- Se determinó que los suelos residuales muestreados que fueron expuestos al efecto de las altas temperaturas (Incendios) presentaron cambios significativos en los parámetros geotécnicos relacionados con la erosión superficial.
- Se pudo validar una metodología para la simulación del incendio, que permitió realizar controlar y toma de datos, la toma de muestras, las cuales al caracterizarse lograron definir la variación de parámetros geotécnicos relacionados con la erosión superficial.
- Se determinó que los cambios producidos por la exposición del suelo residual a los incendios se basan, principalmente, en cambios en la estructura (Agregaciones y agrietamientos) que causan condiciones más desfavorables ante la exposición del suelo al agua o a cargas.
- La exposición del suelo residual al efecto de las altas temperaturas, ocasiona agregaciones las cuales se validaron mediante la granulometría y los ensayos de microscopia, esto sumado al efecto de la contracción y la generación de grietas, lo que se traduce en planos de debilidad y zonas por las que el agua ingresa más fácilmente a la masa de suelo.
- Se determinó al realizar los ensayos de clasificación mediante límites de atterberg que existe una variación en la curva de fluidez del suelo residual sometido a incendios respecto al suelo en condición natural. Donde la curva del suelo quemado está por encima de la natural. Comportamiento que puede ser explicado por el aumento en la succión osmótica, pero, debido a que la succión matricial cae sustancialmente en los sitios donde se producen los agrietamientos y a que se produce una reducción en la cohesión, producto de la agregación, el comportamiento del suelo no remodelado mostró una reducción en su resistencia.
- De las pruebas realizadas, se pudo establecer, que las muestras que estuvieron sometidas al efecto del incendio, aumentaron su contracción respecto a las lecturas del suelo natural. El fenómeno de contracción excesiva puede generar que el suelo presente grietas, las cuales son desfavorables ante la presencia de agua, y adicionalmente, debilitan la masa de suelo ante sollicitaciones impuestas.
- Mediante el ensayo de microscopia, se pudo comprobar que se generaron agregación y fisuras en los suelos residuales que fueron sometidos a incendios, lo que fue observado principalmente a 100X y 500X

- Se realizaron ensayos químicos sobre las muestras de suelo residuales en condición natural y las muestras sometidas a incendios, en este caso ocurrió un aumento en el contenido de hierro y magnesio (iones que están usualmente presente en el agua del nivel freático), y dicho aumento se pudo deber al proceso de cristalización y precipitación causados por el incendio controlado, o también a la mayor presencia de goethita en el ensayo en la muestra tomada.
- Estos iones de hierro y magnesio presentan, usualmente con cargas positivas, pueden ser las que ocasionan el incremento en el límite líquido, pues el aumento en el contenido de estos iones, causaría una carga predominantemente positiva en la superficie. Lo que no es tan afín con las moléculas de agua, pues estas típicamente se adhieren a superficies con carga negativa.
- Otro aspecto importante a mencionar es que al calcular el punto de carga cero de ambas muestras, PCZ (natural y quemada), la diferencia entre el PH en agua de la muestra quemada respecto a su punto de carga cero, es menor que la diferencia entre el PH en agua del suelo natural y su punto de carga cero, ya que las partículas tienden a flocular más en medios más cercanos al punto de carga cero (siempre que no sean medios más alcalinos). Implica que las partículas del suelo quemado se agregan más, que las del suelo natural (Camapum, 2015), resultado que concuerda con lo evidenciado en los ensayos de hidrómetro
- El resultado de la succión matricial muestra que, en el suelo sometido a incendios, para los microporos y poros de tamaño medio existe un leve incremento en la succión. Lo que no sucede en la zona de los macro poros, pues en dicha zona se puede observar una caída en la succión por efecto del agrietamiento, en una de las muestras seleccionadas para el ensayo.
- De los ensayos de Corte directo, se puede concluir que los parámetros geotécnicos sufren una serie de cambios importantes, pues los suelos luego de someterse al efecto del incendio, presentan pérdida de la cohesión, situación que obedece a la formación de agregaciones y a la presencia de agrietamientos.
- De los ensayos de estabilidad realizados, es posible concluir que: para taludes con pendientes mayores a 30° , (empleando los parámetros determinados para los suelos residuales muestreados tanto quemados como naturales), se obtienen diferencias considerables en el factor de seguridad, donde los suelos quemados siempre presentan factores más bajos, e incluso, para la pendiente mencionada, este no cumple con lo requerido por la norma, donde el factor de seguridad mínimo debe ser por lo menos de 1,5 en condición estática.
- Otra conclusión obtenida a partir de los ensayos de estabilidad, es que para los parámetros residuales determinados para el suelo, al evaluarse taludes con pendientes mayores de 40° , se presentan fenómenos de erosión superficial importantes en los suelos quemados.
- Durante las pruebas de Pinhole, se logró identificar que los suelos en condición natural no son especialmente susceptibles a la erosión. Mientras que, en los suelos sometidos a

incendios se presentaron lavados y aumento del caudal durante la prueba, demostrando así que el mismo suelo, luego, de someterse a un incendio aumenta su erodabilidad.

- Durante los ensayos Inderbitzen, se obtuvo una erosión $E=0,213 \text{ gr/cm}^2$ en los suelos quemados, mientras que, para los suelos naturales un valor de $E=0,089 \text{ gr/cm}^2$, resultado que demuestra que aumenta la erodabilidad de un mismo suelo, luego de ser quemado. Esto, sumado a los otros resultados, demuestra que existe un aumento significativo en la erodabilidad del suelo, provocada por los agrietamientos y la agregación de partículas.
- Es importante realizar este tipo de investigaciones para ampliar el conocimiento del efecto de los incendios y las quemadas controladas en nuestros suelos. Información que debe ser divulgada procurando crear conciencia de los riesgos que inducen estas prácticas.

1.1 Recomendaciones y limitaciones

- Para tener una mejor comprensión del efecto de los incendios en las propiedades geotécnicas en los suelos residuales, se recomienda realizar un nuevo trabajo de investigación utilizando ensayos de erodabilidad tipo Inderbitzen con diferente pendiente, información que permitirá comprobar que pendientes son las más críticas.
- Debido a la manera en la que se realizó el incendio controlado y a la necesidad de retirar la materia orgánica, no se pudieron alcanzar las características de un incendio de altas temperaturas, razón por la que no se pudieron identificar cambios mineralógicos y químicos considerables. Se recomienda para próximos estudios una mayor limpieza del material orgánico previo al inicio de la prueba, permitiendo que el suelo que será ensayado alcance temperaturas mayores.
- Se propone realizar una batería de ensayos similar a la mencionada en este documento, en muestras de suelo, que hubiesen sido sometidas a incendios de altas temperaturas, permitiendo identificar que cambios sufren los suelos residuales en estas condiciones. Igualmente se sugiere que en incendios de mayor temperatura se considere realizar una mayor cantidad de ensayos químicos.
- Es importante que en próximas investigaciones se calibre un modelo numérico alimentado con las características del suelo estudiado (el cual podrá ser validado con los resultados de esta investigación) permitiendo establecer los tiempos y características para pruebas en campo.
- Se propone realizar pruebas de corte directo a muestras extraídas a diferentes profundidades, con el fin de validar la variación en la resistencia con el cambio de temperatura.
- Se recomienda realizar ensayos Inderbitzen en diferentes suelos residuales y emplear tamices de diferentes tamaños, con el fin de caracterizar el material erodado y su clasificación, obteniendo, cuales partículas son las más susceptibles a dicho fenómeno, una vez el suelo fue sometido a incendios.
- Se deberá realizar un nuevo incendio controlado en campo, simulando una vegetación de mayor tamaño, pues aunque la teoría dicte que el efecto de incendios sobre este tipo de vegetación es menos crítico para el suelo, dicho resultado se debería someter a una comprobación.
- Se propone realizar este mismo tipo de pruebas sobre diferentes suelos a lo largo del territorio Colombiano, especialmente en zonas donde se realizan quemas controladas y donde se siembre con mayor frecuencia.
- Ya que, en el actual documento y los presentados por otros autores para otros tipos de suelos, se indica que los suelos finos son susceptibles al efecto de los incendios, se deberá establecer un protocolo para evaluar el riesgo que representan los incendios en los suelos próximos a obras como vías o viviendas en zonas de pendientes.

Referencias bibliográficas

1. Alcaldía de Bello. (2016). Anuario Estadístico de Bello 2016. Bello.
2. Andreu, V.J. Rubio, L. 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.: Geofoma Ediciones 79-90, 1994.
3. Arrieta Rodríguez, M. T. (2011). Biomineralización Aplicada a La Mitigación De Procesos Erosivos Superficiales, En Un Suelo Tropical De La Ciudad de Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/5472/1/1103096887.2011.pdf>.
4. Asociación colombiana de ingeniería sísmica.(2010), Reglamento colombiano de construcción sismo resistente, Ministerio de ambiente Vivienda y desarrollo territorial, Bogota.
5. Association of Swiss Road and Traffic Engineers.(2007), Characteristic Coefficients of soil. Swiss Standard SN 670 010b, Swiss.
6. ASTM Committee D-18 , Special Procedures for Testing Soil and Rock for Engineering Purposes: Fifth Edition, 1970.
7. ASTM D2216-10. (n.d.). Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, (November 1988), 1–7.
8. ASTM D2487-11. (2006). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM Standard Guide, 1–5.
9. ASTM D3080-11. (n.d.). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, 1–9.
10. ASTM D422-63. (n.d.). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, 63(Reapproved 2007), 1–8.
11. ASTM D4318-10. (n.d.). Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, 1–16.

12. ASTM D5298-10. (n.d.). D5298-94: Standard Test Method for the Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. Annual Book of ASTM Standards, 1–6.
13. ASTM D7015-13. (2013). Standard Practices for Obtaining Intact Block (Cubical and Cylindrical) Samples of, 1–7.
14. ASTM D854-10. (n.d.). Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. The American Society for Testing and Materials, West , 1–8.
15. ASTM D854-10. (n.d.). Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. The American Society for Testing and Materials, West, 1–8.
16. Blanco, J. (2008). Curso básico de incendios forestales destinado a personal de operación y extensión, Universidad de Lleida. Lérida.
17. Blight, E. (1997). Mechanics of residual soils. Balkema.Rotterddam.
18. BOE (boletín informativo del estado del gobierno de España) en su ley 43 del 2003, artículo 6
19. Camapum de Carvalho, J., Martines Sales, M., Moreira de Sousa, N., & da Silva Melo, M. (2006). Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro. (FINATEC, Ed.) (1st ed.). Brasília.
20. Camapum de Carvalho, J., Martines Sales, M., Moreira de Souza, N., and Da silva Melo, M. T. (2006), Processos Erosivos No Centro-Oeste Brasileiro. FINATEC.
21. Camapun de Carvallo, J., (2015) .Solos não saturados no contexto geotécnico, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS), São Paulo.
22. Camapun de Carvallo, J., Processos Erosivos no Centro- Oeste Brasileiro, Editora FINATEC, Brasil, 2006.
23. Cambell, G. S.; Jungbauer, J. D.; Bidlake, W. R. & Hungerford, R. D. (1994). Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity. Soil Sci.158.
24. Carballas M., (1993). Carbon- and nitrogen-containing compounds in composted urban refuses. Instituto de Investigaciones Agrobiológicas de Galicia (CSIC), Santiago de Compostela.
25. Cassol, E. A. D. Martins, D. F. Eltz y R. Falleiro, (2004). Erosividade das chuvas em Taquari, RS, (1963) determinada pelo índice EI30, no período de 1963 a 1999., Santa Maria: In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DE SOLO E ÁGUA,, p15.

26. Celeste, W., Brian A.(2017). 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*,p 43-47,Colorado.
27. Chandler, R. J., Crilly, M. S., Montgomery S. G. (1992). A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. *Proceedings of the Institute of Civil Engineering* (2nd ed.).
28. Coles H.G., Morrison C.G.T.(1930). Dehydration and soil acidity, *Soil Sci.* 29.
29. Consorcio Microzonificación Sísmica. (2006). Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, la Estrella, caldas y envigado. Área metropolitana , Medellín
30. Das, B.(2008). *Advanced Soil Mechanics*, Taylor & Francis, London & New York.
31. DeBano, L. F. (1981). Water repellent soils: a state-of-the-art. Gen. Tech. Rep. PSW-46. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. Berkeley, CA.
32. DeBano, L.F. (1990). Effects of fire on soil resource in Arizona chaparral. In: Krammes, J.S. (tech. coord.). *Effects of fire management of southwestern natural resources*. Gen. Tech. Rep. RM- 191. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. Fort Collins, CO.
33. DeBano, L.F. (2000). The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *Journal of Hydrology*.Tucson Arizona.
34. Díaz-Fierros F, Soltres F. G., Cabaneiro A 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.
35. Ela S. D, 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.
36. Ferreira, L. (2015). Ensaio de inderbitzen para avaliação da erodibilidade dos solos e rochas: aplicação nas regiões de Santa Maria, São Francisco de Assis e Porto Alegre/rs. Santa Maria
37. Fookes, G. P. (2004). *Suelos Residuales Tropicales*. Traducción de Fabián Hoyos. (H. N. Editores, Ed.). Medellín.

38. GIMENO, P. (1987). Impacto del fuego sobre ecosistemas edáficos. Tesis de Licenciatura. Facultad de Farmacia. Universidad Complutense de Madrid.
39. Giovannini, G.; Lucchesi, S., Giachetti, M. (1989). Beneficial and detrimental effects of heating on soil quality. *Fire and Ecosystem Dynamics Mediterranean and Northern Perspectives*. Goldammer, J. C. y Jenkins, M. J. (eds). Academic Publishing, The Hague.
40. Giovannini, G.; Lucchesi, S., Giachetti, M. (1990). Effects of heating on some chemical parameters related to soil fertility and plant growth. *Soil Sci.* 149: 344-350.
41. GONZALEZ, J. (1998). Degradación de suelos por incendios forestales. Ponencia presentada en el Curso superior de "Evaluación y Conservación de suelos". Centro de Investigación y Desarrollo Agrario, Granada. Junta de Andalucía.
42. IDEAM. (2011). Boletín forestal 2008-2010, Bogotá, D. C. Imprenta Nacional de Colombia.
43. Ley N°43, 2003, Artículo 5. Definiciones. Boletín informativo del estado del gobierno de España (BOE). Sábado 22 noviembre 2003.
44. Ley N°43, 2003, Artículo 6. Definiciones. Boletín informativo del estado del gobierno de España (BOE). Sábado 22 noviembre 2003.
45. Lima, "Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas". (2003) Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental, Brasília, DF, Brasília.
46. Mangas V. J., Sanchez J.R., Ortiz C.,(1992). Effects of a fire on runoff and erosion on Mediterranean forest soil in SE Spain. Catena.
47. Marinho, F,A,. (1994) . Medição de sucção com o método do papel filtro. Cobramsef. Volumen10, p. 515-522.Brasil.
48. Martínez, J., De las Heras, J. y Herranz, J. (1991). Impacto ecológico de los incendios forestales. Universidad de Castilla . La Mancha.
49. Mataix J,. (1994). Dissertation sur la nature et la propagation du feu, Prault, Paris
50. Mertens, K. Tolossa A. R., M. Dumon V. A., J. DECKERS y E. VAN RANST, «Impact of traditional soil burning (guie) on Planosol properties and land-use intensification in southwestern Ethiopia,» British Society of Soil Science, Soil Use and Management, vol. 31, p. 330–336, 2015.

51. Ministerio de medio ambiente. (2000). Plan Nacional de Desarrollo Forestal, Bogotá, D. C. Imprenta Nacional de Colombia.
52. Moore D. C. y M. J. (1990) Singer, Crust formation effects on soil erosion processes, Soil Sci. Soc. Am. J.
53. Morell, I. (1998), Plaguicidas Aspectos ambientales, analíticos y toxicológicos. Publicación universidad Jaume I ,Castellón de la Plana
54. Municipio de Medellín. (2005), Documento de diagnóstico del cerro el Volador .Proyecto Planes de Manejo y gestión integral de los cerros tutelares de Medellín .Convenio interadministrativo No.4800000616 con la Universidad de Antioquia .Medellin .
55. NBR 14114/98, Solo-solos argilosos dispersivos- identificação e classificação por meio do ensaio do furo e agulha (pinhole test). Comitê Brasileiro de Construção Civi
56. Neil H. Berg.(1989).Proceedings of the Symposium on Fire and Watershed Management. Sacramento California. United States Department of Agriculture Forest Service.
57. Nogami ,J.S. and Cozzolino.A. identificação de Solos Tropicais:dificuldades e proposta de um método preliminar . Anais da 20° Reuniao Anual de pavimentação. Fortaleza Brasil.
58. Nogami S. (1995).Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. Sao Pablo.
59. NTC – 3651. Calidad del agua. Determinación del ph. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) Bogotá, D.C.
60. NTC – 5151. Determinación de los contenidos de calcio, cobre, hierro, magnesio, manganeso, potasio, sodio y zinc. Método usando espectrometría de absorción atómica. Bogotá, D.C
61. Owensby, C. E. & Wyrill, J. B. (1973). Effect of range burning on Kansas Flint Hill soils. J. Range. Manage.
62. Patiño, J., Álvarez, M. C., Valencia, Y., & Echeverri, O. (Octubre de 2014). Efecto de la temperatura en algunas propiedades geotécnicas de un suelo tropical. XIV Congreso Colombiano de Geotecnia. Bogotá.
63. Patton A.D. (1971). Estabilidad de taludes en suelos residuales. IV congreso panamericano de mecánica de suelos y cimentaciones. San Juan Puerto Rico.
64. R. C. Graham y A. L. Ulery, Forest fire effects on soil color and texture, Soil Sci. Soc. Am. J. 57: 135-140. 1993.

65. Redacción Nacional. (2015). Nuevo incendio en el cerro El Volador de Medellín. El Espectador. Medellín.
66. Redin M. dos Santos , Miguel P., G. d. F.. Denega, M. Lupatini, A. Doneda y E. Lorensi de Souza,(2001). Impactos da queima sobre atributos químicos, físicos e biológicos do solo, Revista Ciencia Forestal, v. 21. n.
67. Rosero J., Osorio I.,(2013). Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo. Estado del arte. Cuaderno Activa revista científica de la facultad de ingeniería , Politécnico de Antioquia. Medellín.
68. Salazar, R. A., (2015). Herramientas para el escultismo, manual de técnica Scout y supervivencia .Comisión nacional Nacional Scout.
69. Sertsu, S. M., Sanchez, P. A. (1978). Effects of heating on some changes in soil properties in relation to an Ethiopian land management practice. Soil Sci. Soc Am. J.42
70. Silva, A. (2016). Análise do Histórico de Desenvolvimento de Modelos de Aparelho de Inderbitzen para a Confecção de Tabelas Comparativas.
71. Soares R. V., (1995). Queimas controladas: prós |e contras, Piracicaba: IPEF: In: Fórum nacional sobre incêndios florestais; reunião conjunta, p. 6-10.
72. Solera J. M, (1999). Alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelos afectados por incendios forestales. Contribución a su conservación y regeneración. Tesis de Doctorado., Universidad de Alicante.
73. Tarantino, A., & Romero, E. (2008). Laboratory and Field Testing of Unsaturated Soils. Springer.
74. Tarantino, A., & Romero, E. (2008). Laboratory and Field Testing of Unsaturated Soils. Springer.D.V.,Trento.
75. Ulery , A. L., Graham, R. C. (1993). Forest fire effects on soil color and texture. Soil Sci. Soc. Am. J. 57.
76. United States Department of Agriculture (USDA), (2005).Wildland fire in ecosystems Effects of Fire on Soil and Water. Volumen 4. USA.USGS.
77. Valencia Gonzalez Y., (2011). 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.

78. Villota, H., (1991). Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de las tierras. Instituto Agustín Codazzi. Santafé de Bogotá
79. Wells D, W. G. II. (1987). The effects of fire on the generation of debris flows in southern California. Reviews in Engineering Geology VII:105-114.
80. Wells, W. G. II. (1987). The effects of fire on the generation of debris flows in southern California. Reviews in Engineering Geology VII:105-114.
81. Wright, H. (1982). Fire Ecology in the United State and southern Canada, . John Wiley and Sons, New York.
82. Zabala, W. (2010). Cristalización Sulfato ferroso Heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo.

Anexo: Ensayos del laboratorio

1. Humedad

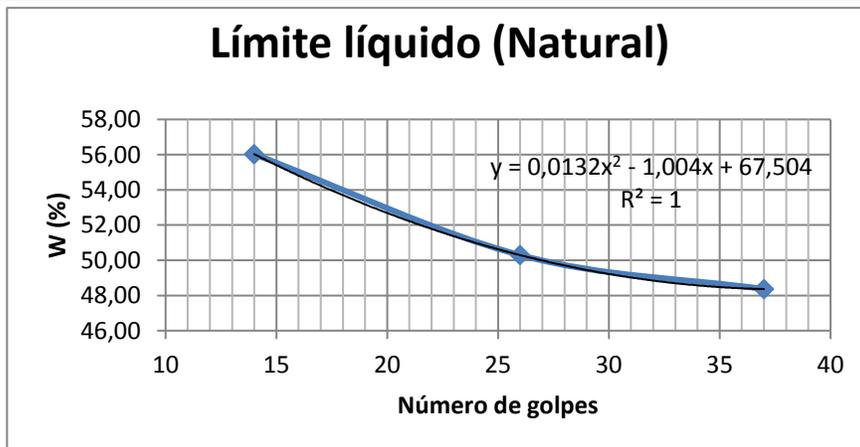
A continuación se presentan los dos primeros ensayos de humedad realizados a las muestras.

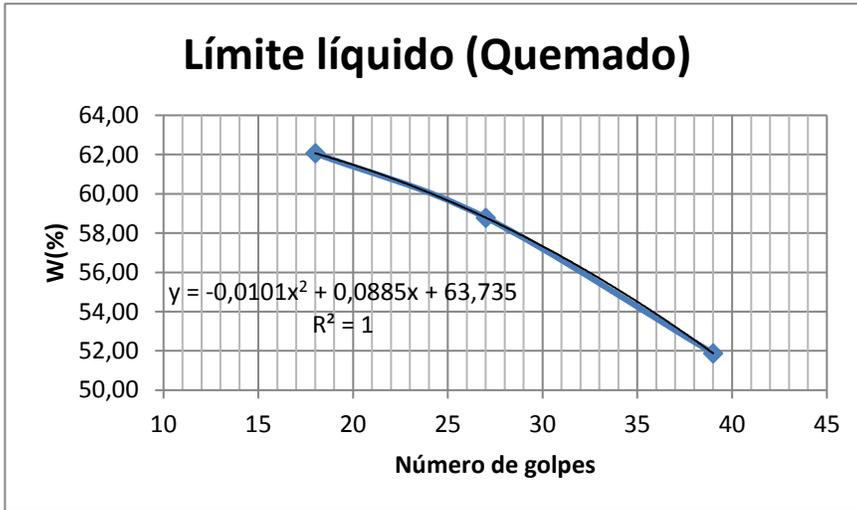
Humedad muestra natural					
Muestra	Tara+ Suelo húmedo (g)	Tara (g)	Peso seco (g)	W%	W% (promedio)
A143	41,19	18,84	37,21	21,6657594	22,05
A78	44,96	21,26	41,21	18,7969925	
A193	51,07	23,37	45,41	25,6805808	
Humedad muestra quemada					
Muestra	Tara+ Suelo húmedo (g)	Tara (g)	Peso seco (g)	W%	W% (promedio)
A161	36,23	19,74	34,03	15,3953814	15,53
A92	31,35	19,11	29,67	15,9090909	
A15	34,54	19,39	32,53	15,2968037	

2. LÍMITES DE CONSISTENCIA

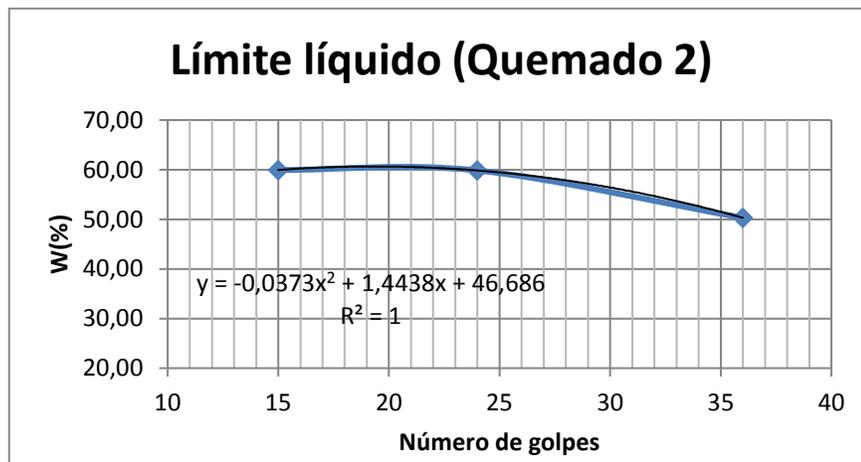
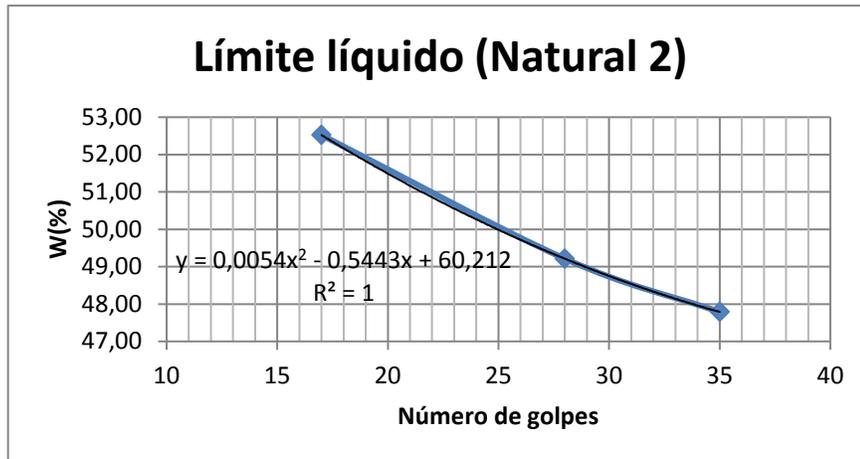
Límite líquido

Límites de consistencia(muestra natural)						25	
Tara (g)	Tara+ suelo (g)	Seco (g)	Golpes	W%	W% (prom)	LL	
19,14	23,23	21,91	37	47,65	48,36	50,7	
21,4	27,22	25,33		48,09			
19,77	24,28	22,79		49,34			
Tara (g)	Tara+ suelo (g)	Seco (g)	Golpes	W%	W% (prom)		50,7
19,27	25,7	23,54	26	50,59	50,29		
21,64	26,38	24,8		50,00			
20,29	25,55	23,79		50,29			
Tara (g)	Tara+ suelo (g)	Seco (g)	Golpes	W%	W% (prom)		50,7
18,94	23,7	22	14	55,56	56,03		
20,61	29,02	26,01		55,74			
20,14	23,84	22,5		56,78			
Límites de consistencia(muestra quemada)						25	
Tara (g)	Tara+ suelo (g)	Seco (g)	Golpes	W%	W% (prom)	LL	
20,20	24,69	23,14	39	52,72	51,88	60	
22,99	28,97	26,92		52,16			
18,78	22,79	21,44		50,75			
Tara (g)	Tara+ suelo (g)	Seco (g)	Golpes	W%	W% (prom)		60
19,52	25,13	23,04	27	59,38	58,79		
20,01	23,31	22,09		58,65			
24,85	29,6	27,85		58,33			
Tara (g)	Tara+ suelo (g)	Seco (g)	Golpes	W%	W% (prom)		60
19,63	24,92	22,88	18	62,77	62,07		
19,42	25,32	23,08		61,20			
20,23	25,47	23,46		62,23			





Ensayo 2	Límites de consistencia(muestra natural)								
	Tara (g)	Tara+ suelo (g)	Seco (g)	Golpes	W%	W% (prom)	LL		
	21,09	25,59	24,12	35	48,51	47,79	50,0		
	19,59	24,73	23,08		47,28				
	18,58	23,14	21,67		47,57				
	Tara (g)	Tara+ suelo (g)	Seco (g)	Golpes	W%	W% (prom)			
	19,28	23,12	21,85	28	49,42	49,21			
	19,93	25,28	23,51		49,44				
	22,21	26,48	25,08		48,78				
	Tara (g)	Tara+ suelo (g)	Seco (g)	Golpes	W%	W% (prom)			
	20,22	25,41	23,63	17	52,20	52,52			
	20,26	25,34	23,58		53,01				
	19,67	25,17	23,28		52,35				
	Límites de consistencia(muestra quemada)					25			
	Tara (g)	Tara+ suelo (g)	Seco (g)	Golpes	W%	W% (prom)	LL		
	21,74	25,78	24,44	36	49,63	50,30			
	20,18	23,94	22,68		50,40				
	19,18	23,48	22,03		50,88				
	Tara (g)	Tara+ suelo (g)	Seco (g)	Golpes	W%	W% (prom)	59		
	20,62	25,11	23,42	24	60,36	59,84			
22,07	27,21	25,28	60,12						
23,8	27,14	25,9	59,05						
Tara (g)	Tara+ suelo (g)	Seco (g)	Golpes	W%	W% (prom)				
19,89	23,12	21,92	15	59,11	59,95				
19,28	24,15	22,31		60,73					
24,46	27,26	26,21		60,00					



Límite plástico

Límite plástico natural

Muestra 1	Tara (g)	Tara+ suelo (g)	Seco (g)	W%	W% (prom)
A61	18,99	19,92	19,72	27,3972603	26,62
A223	19,66	20,93	20,67	25,7425743	
A40	19,96	21,24	20,97	26,7326733	

Limite plástico quemado

Muestra 1 Q	Tara (g)	Tara+ suelo (g)	Seco (g)	W%	W% (prom)
A171	20,3	22,53	22,01	30,409	32,75
A97	21,85	23,42	23,03	33,051	
K150	19,06	20,92	20,44	34,783	

Limite plástico natural 2

Muestra 2	Tara (g)	Tara+ suelo (g)	Seco (g)	W%	W% (prom)
A61	18,99	21,43	20,92	26,4248705	27,57
A223	19,66	23,68	22,79	28,4345048	
A40	19,96	24,32	23,37	27,8592375	

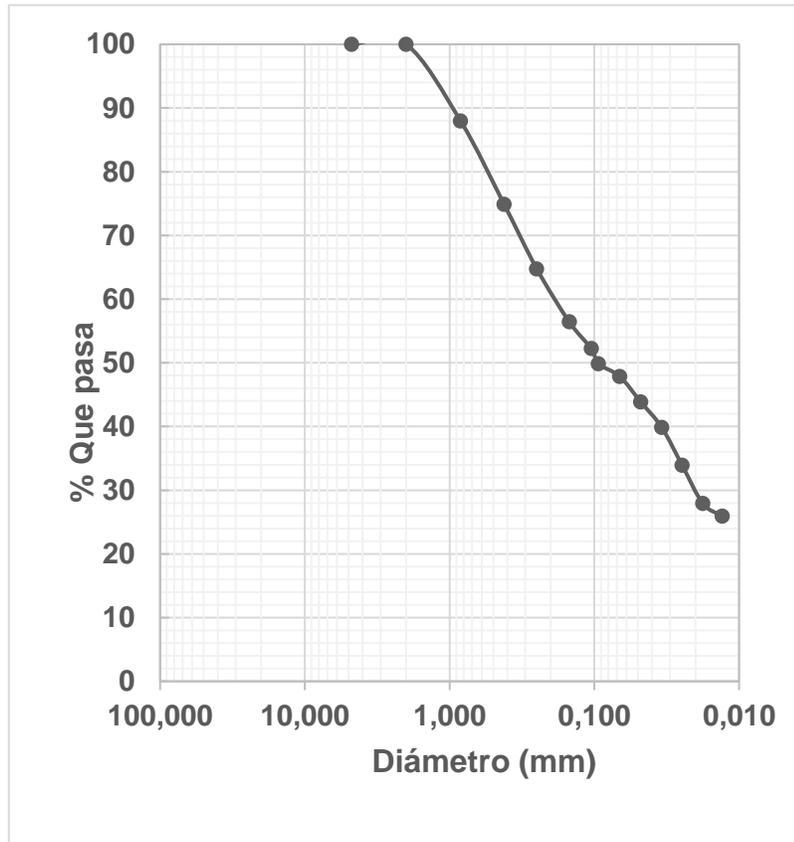
Limite plástico quemado 2

Muestra 2 Q	Tara (g)	Tara+ suelo (g)	Seco (g)	W%	W% (prom)
A171	20,3	25,34	24,12	31,937	32,88
A97	21,85	23,47	23,05	35,000	
K150	19,06	23,67	22,56	31,714	

3. HIDROMETRO

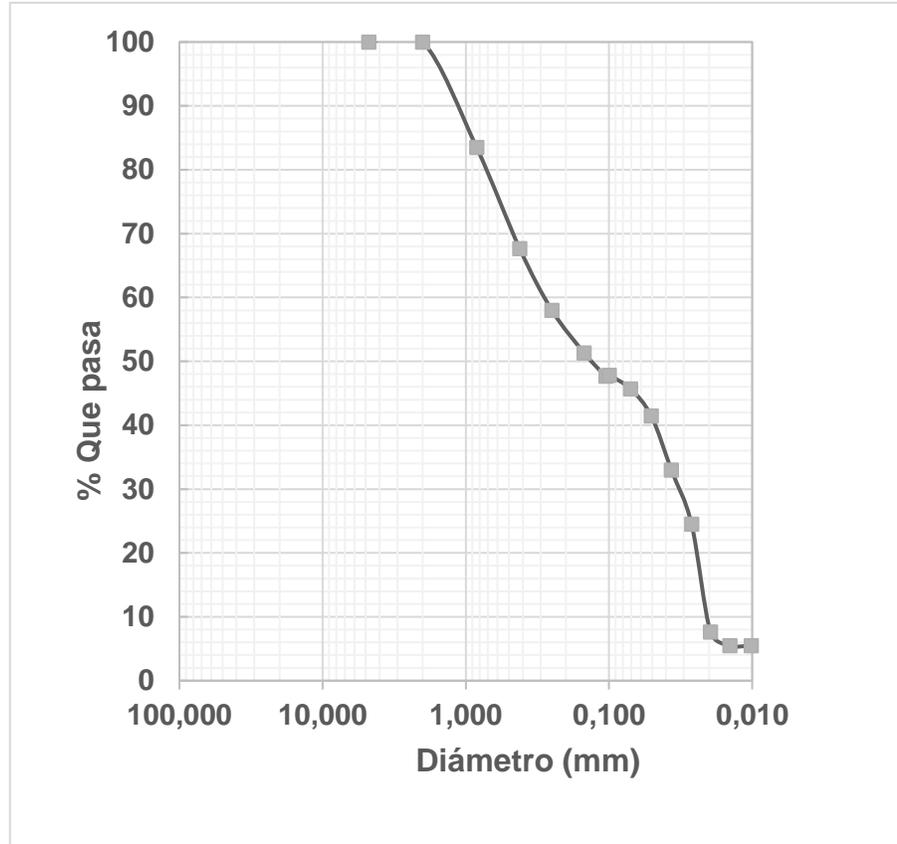
Hidrómetro muestra natural con defloculante

Diámetro (mm)	% pasa
4,76	100,0
2,00	100,0
0,84	88,0
0,42	74,9
0,25	64,8
0,149	56,4
0,105	52,3
0,094	49,9
0,067	47,9
0,048	43,9
0,034	39,9
0,025	33,9
0,018	27,9
0,013	25,9
0,009	23,9
0,007	19,9
0,005	14,0
0,003	10,0
0,003	10,0
0,001	10,0



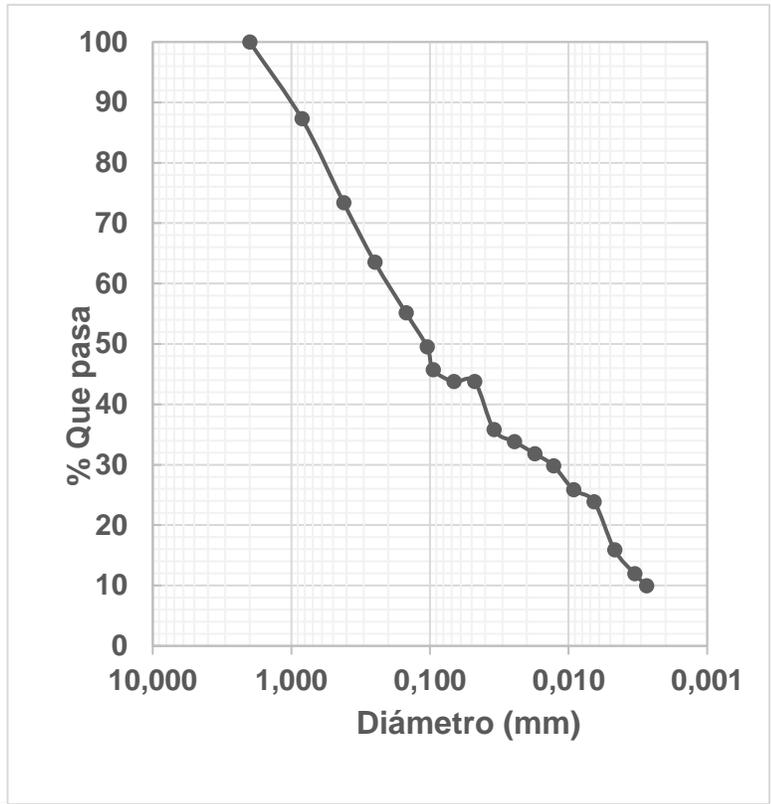
Hidrómetro muestra natural con agua

Diámetro (mm)	% pasa
4,76	100,0
2,00	100,0
0,84	83,5
0,42	67,6
0,25	58,0
0,149	51,3
0,105	47,6
0,099	47,8
0,071	45,7
0,051	41,4
0,037	33,0
0,027	24,5
0,020	7,6
0,014	5,5
0,010	5,5
0,007	5,5
0,005	6,3
0,004	4,2
0,003	4,2
0,001	2,1



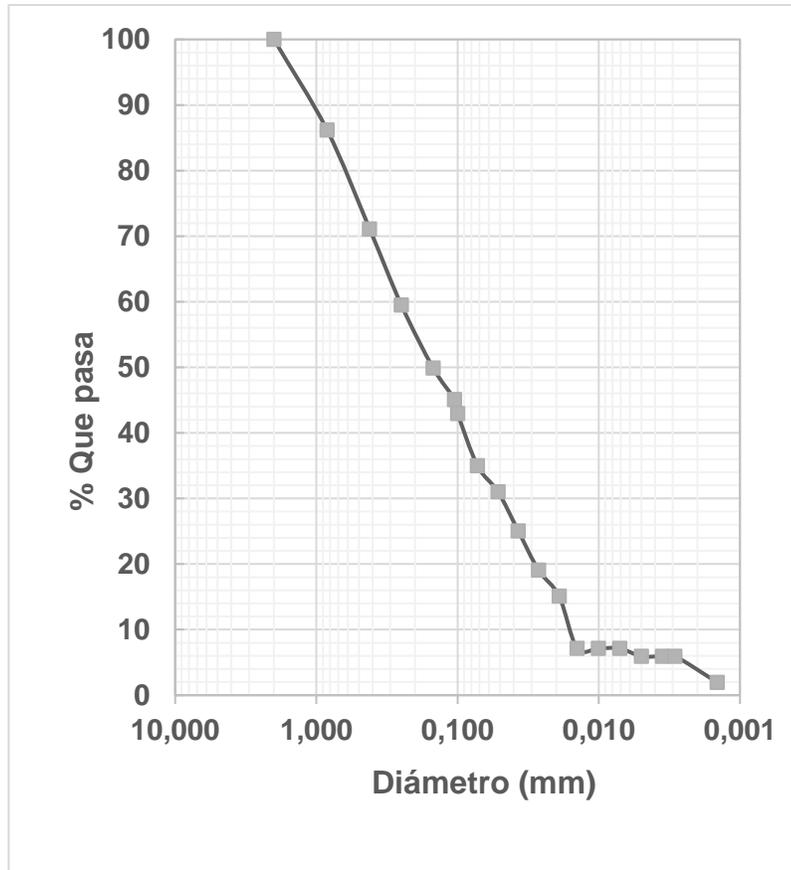
Hidrómetro muestra quemada con defloculante

Diámetro (mm)	% pasa
4,76	100,0
2,00	100,0
0,84	87,3
0,42	73,4
0,25	63,5
0,149	55,1
0,105	49,5
0,095	45,7
0,067	43,8
0,048	43,8
0,035	35,8
0,025	33,8
0,018	31,8
0,013	29,8
0,009	25,9
0,007	23,9
0,005	15,9
0,003	11,9
0,003	9,9



Hidrómetro muestra quemada con agua

Diámetro (mm)	% pasa
4,76	100,0
2,00	100,0
0,84	86,2
0,42	71,1
0,25	59,5
0,149	49,9
0,105	45,1
0,100	42,9
0,072	35,0
0,052	31,0
0,037	25,0
0,027	19,1
0,019	15,1
0,014	7,1
0,010	7,1
0,007	7,1
0,005	5,9
0,004	5,9
0,003	5,9
0,001	2,0



4. Clasificación MCT rápida

MCT NATURAL CON AGUA				
Número de aro	Diametro1 (mm)	Diametro2 (mm)	Diametro3 (mm)	Promedio
5	21,01	21,3	21,11	21,14
11	20,99	21,21	20,77	20,99
12	21,3	21,23	21,11	21,21
SECO AL AIRE				
Número de aro	Diametro1 (mm)	Diametro2 (mm)	Diametro3 (mm)	Promedio
5	20,21	20,19	19,9	20,10
11	19,88	20,39	20,25	20,17
12	20,05	20,08	20,21	20,11
PENETRACIÓN				
Número de aro	penetración 1	penetración 2	penetración 3	
5	4	3	4	
11	3	2	3	
12	3	4	3	

CT	C'
1,04	1,43
0,82	1,22
1,10	1,48
PROM	1,38

MCT QUEMADA CON AGUA				
Número de aro	Diametro1 (mm)	Diametro2 (mm)	Diametro3 (mm)	Promedio
3	20,85	20,95	21,27	21,02
15	21,25	21,12	21,45	21,27
1	21,06	20,91	21,02	21,00
SECO AL AIRE				
Número de aro	Diametro1 (mm)	Diametro2 (mm)	Diametro3 (mm)	Promedio
3	19,81	19,39	19,6	19,60
15	19,8	20,03	19,73	19,85
1	19,6	19,69	19,47	19,59
PENETRACIÓN				
Número de aro	penetración 1	penetración 2	penetración 3	
3	4	4	4	
15	3	3	4	
1	4	5	4	

CT	C'
1,4	1,71
1,4	1,70
1,4	1,70
PROM	1,74

5. Difracción de raios x

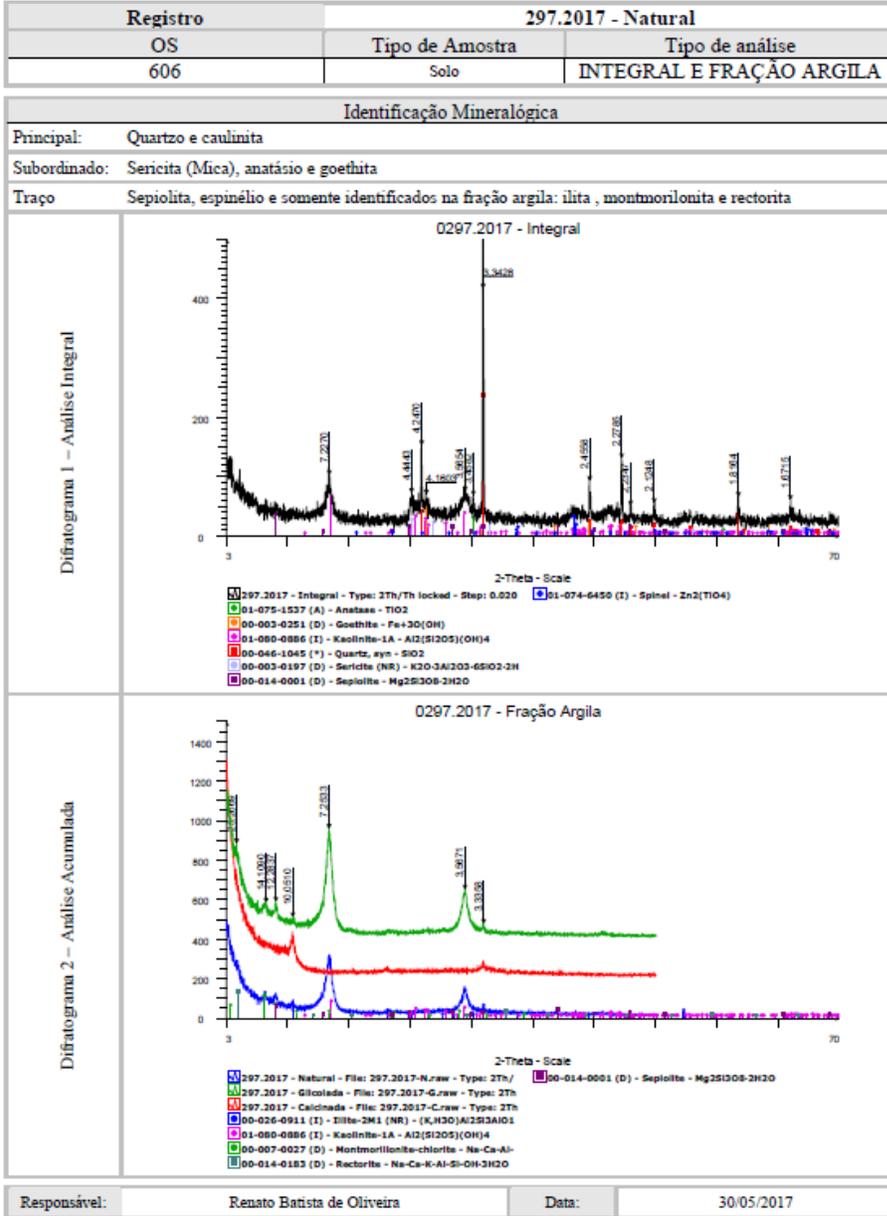
Muestra natural



SISTEMA DE GESTÃO DA QUALIDADE

GERÊNCIA DE SERVIÇOS TECNOLÓGICOS

Difratometria de Raios-X - Análise



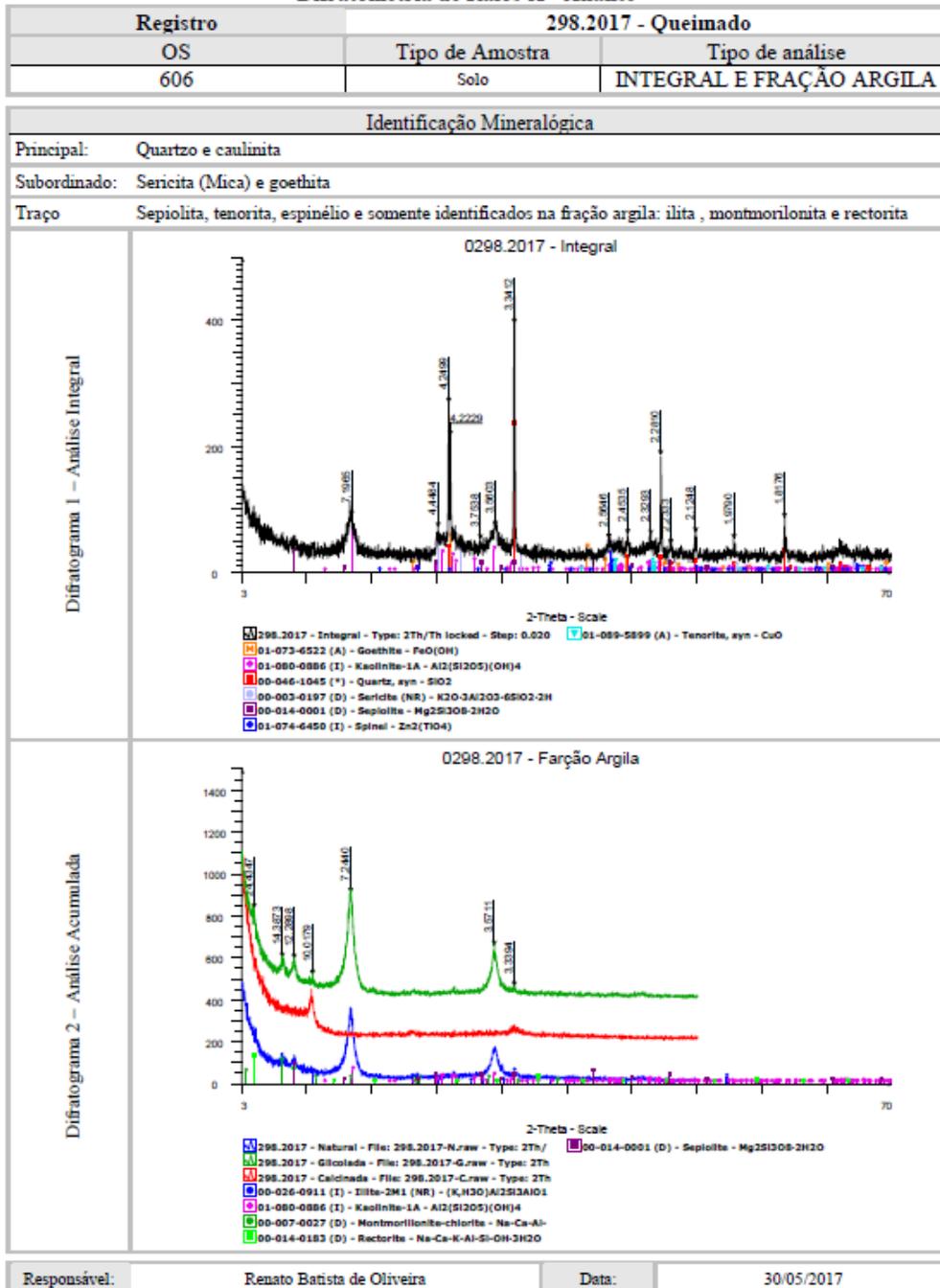
Muestra quemada



SISTEMA DE GESTÃO DA QUALIDADE

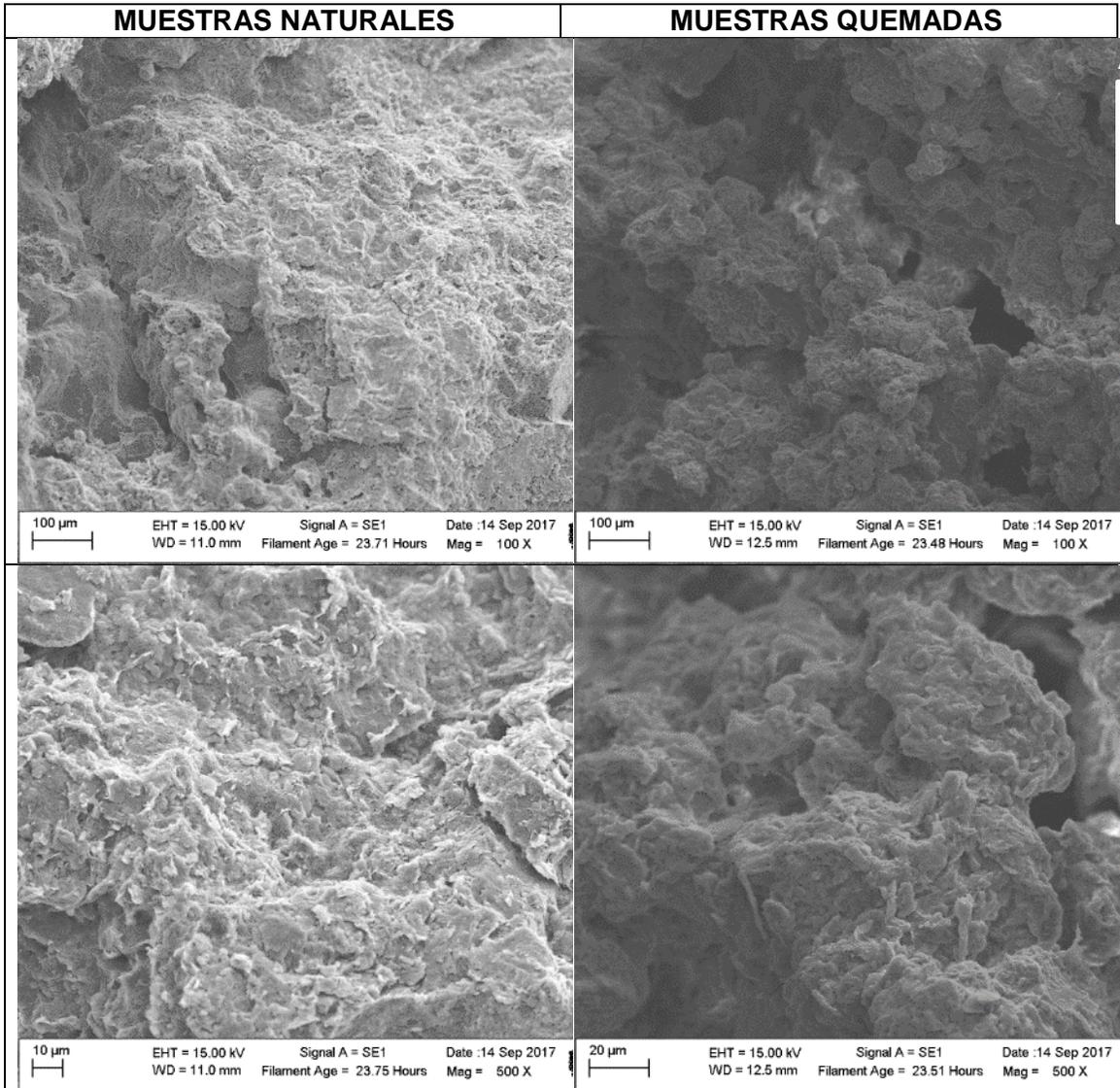
GERÊNCIA DE SERVIÇOS TECNOLÓGICOS

Difratometria de Raios-X - Análise



6. Microscopía electrónica de barrido (SEM)





7. Caracterización química



Identificación
 Nombre YAMIL E. VALENCIA GONZALEZ
 Nitro C.C. 43624303
 Dirección FACULTAD DE MINAS -MI- LAB 321.
 Teléfono 425-51-87
 Fax 3013869777
 Email yvalenc@unal.edu.co;valenc@unal.edu
 F. Recibo 09-MAR-17

Municipio Bello (Antioquia)
 Vereda Sin Especificar
 Finca No Especificado
 Área - Ha.
 Profundidad - cms.

Análisis de Suelos

Reporte No. 49091

Código	Identificación en el campo	Textura		pH	C.E.	M.O.	Al	Ca	Mg	K	Na	CICE	P	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B	N-NO3	N-NH4	N	
		A%	L%																				Ar%
SI6441	M1 -PR- 0.5m			4.8				0.37	0.22	0.03		.6			39	7	1	1	1	0.1			
SI6442	M2 -PR- 0.5m			4.7				0.46	0.27	0.04		.8			153	12	1	1	0.1				

Observaciones

Métodos
 Textura : Bouyoucos; pH : Agua (1:1); Conductividad eléctrica: Extracto de saturación; Materia orgánica: Walkley Black; Al : NCl 1M; Ca, Mg, K, Na : Acetato de amonio 1M; CICE : Suma de cationes de cambio; S : Fosfato monocalcico 0.008M; Fe, Mn, Cu, Zn : Olsen EDTA; B : Agua caliente; NO3 : Sulfato de aluminio 0.025M; NH4 : NCl 1M; P : Bray II.

Tener en cuenta:
 N.D.=No detectable
 N.A.=No aplica
 Para las unidades considere:
 dSm-1 =mmho cm-1
 cmolc Kg-1 =meq/100 g suelo
 ppm =mg Kg-1

Revisión Agronomica

8. Materia orgánica, Ph en agua Y KCL

Contenido de materia orgánica

Materia orgánica	Colorímetro	
	Color muestra Natural	4
	Color muestra quemada	4

Materia orgánica	Mufla	
	Pérdida muestra natural (g)	10,7
	Pérdida muestra quemada (g)	10,3



Ph en agua y KCL

	NATURAL	QUEMADA
Ph (H ₂ O)	4,8	4,7
Ph (KCL)	3,2	3,3

9. Curva característica de succión

Succión total suelo natural

Humedades cuerpo de prueba [%]				TOTAL GRANDE				TOTAL PEQUEÑO				
P tara (g)	Wt+Wh (g)	Wt+Ws (g)	W% prom %	W prom %	Peso Húmedo (g)	Peso Seco (g)	W papel %	Succión (kPa)	Peso Húmedo (g)	Peso Seco (g)	W papel %	Succión (kPa)
19,49	28,49	28,2	3,33	3,5	0,169	0,157	7,575	23380,18	0,073	0,068	7,048	25210,758
23,47	42,29	41,61	3,75									
21,08	29,9	29,6	3,52									
19,38	30,92	30,27	5,97	5,8	0,195	0,168	15,618	7389,02	0,086	0,075	14,611	8534,530
18,5	32,19	31,46	5,63									
19,32	34,46	33,61	5,95									
19,28	31,84	31,36	3,97	4,1	0,181	0,164	10,299	15828,04	0,088	0,079	11,563	13206,502
23,38	35,65	35,17	4,07									
19,93	34,6	33,99	4,34									
21,74	35,29	34,01	10,43	10,6	0,199	0,168	18,642	4791,42	0,085	0,071	18,627	4801,452
22,21	37,68	36,18	10,74									
20,18	31,32	30,24	10,74									
20,22	33,19	31,59	14,07	14,1	0,198	0,162	22,359	2813,46	0,088	0,072	22,006	2959,739
19,18	33,43	31,64	14,37									
20,26	33,83	32,17	13,94									
20,62	34,02	32,1	16,72	17,3	0,214	0,167	28,511	1165,71	0,092	0,072	27,778	1294,858
19,67	35,74	33,39	17,13									
21,54	34,77	32,74	18,13									
19,83	37,23	34,14	21,59	21,0	0,228	0,170	33,940	535,71	0,112	0,084	33,057	607,943
22,07	35,66	33,42	19,74									
18,93	33	30,49	21,71									
20,27	37,38	33,7	27,40	26,9	0,231	0,169	36,541	369,12	0,117	0,086	35,226	445,600
15,96	27,68	25,18	27,11									
22,65	39,97	36,38	26,15									
23,8	37,98	34,8	28,91	29,0	0,210	0,154	36,393	377,00	0,099	0,072	37,017	344,801
28,82	42,96	39,7	29,96									
19,46	35,31	31,84	28,03									
21,54	38,86	34,74	31,21	31,1	0,204	0,147	38,535	277,43	0,099	0,072	38,408	282,510
19,89	32,49	29,51	30,98									
19,98	37,91	33,65	31,16									
19,28	37,23	32,77	33,06	32,9	0,220	0,158	39,304	248,49	0,097	0,070	38,374	283,892
24,9	39,9	36,24	32,28									
19,28	32,96	29,54	33,33									

Succión matricial suelo natural

Humedades cuerpo de prueba [%]				TOTAL GRANDE					TOTAL PEQUEÑO			
P tara (g)	Wt+Wh (g)	Wt+Ws (g)	P tara (g)	Wt+Wh (g)	Wt+Ws (g)	P tara (g)	Wt+Wh (g)	Wt+Ws (g)	P tara (g)	Wt+Wh (g)	Wt+Ws (g)	P tara (g)
19,49	28,49	28,2	3,33	3,5	0,166	0,155	7,563	23419,62	0,081	0,075	8,043	21864,12
23,47	42,29	41,61	3,75									
21,08	29,9	29,6	3,52									
19,38	30,92	30,27	5,97	5,8	0,183	0,156	16,901	6147,98	0,091	0,078	16,881	6165,58
18,5	32,19	31,46	5,63									
19,32	34,46	33,61	5,95									
19,28	31,84	31,36	3,97	4,1	0,188	0,168	11,674	12998,74	0,078	0,065	20,620	3609,33
23,38	35,65	35,17	4,07									
19,93	34,6	33,99	4,34									
21,74	35,29	34,01	10,43	10,6	0,195	0,161	21,069	3384,61	0,089	0,073	21,585	3143,63
22,21	37,68	36,18	10,74									
20,18	31,32	30,24	10,74									
20,22	33,19	31,59	14,07	14,1	0,201	0,161	24,489	2074,02	0,091	0,073	25,069	1908,61
19,18	33,43	31,64	14,37									
20,26	33,83	32,17	13,94									
20,62	34,02	32,1	16,72	17,3	0,220	0,171	28,856	1109,53	0,091	0,072	27,832	1284,81
19,67	35,74	33,39	17,13									
21,54	34,77	32,74	18,13									
19,83	37,23	34,14	21,59	21,0	0,237	0,182	30,528	873,28	0,110	0,084	30,833	835,92
22,07	35,66	33,42	19,74									
18,93	33	30,49	21,71									
20,27	37,38	33,7	27,40	26,9	0,229	0,167	37,305	330,83	0,108	0,078	38,205	290,83
15,96	27,68	25,18	27,11									
22,65	39,97	36,38	26,15									
23,8	37,98	34,8	28,91	29,0	0,305	0,167	83,193	19,42	0,123	0,070	75,071	25,05
28,82	42,96	39,7	29,96									
19,46	35,31	31,84	28,03									
21,54	38,86	34,74	31,21	31,1	0,320	0,155	106,061	10,63	0,146	0,070	106,970	10,41
19,89	32,49	29,51	30,98									
19,98	37,91	33,65	31,16									
19,28	37,03	32,77	31,58	31,1	0,272	0,157	73,389	26,50	0,137	0,074	84,522	18,67
24,9	39,9	36,24	32,28									
19,28	32,56	29,54	29,43									

Succión total suelo quemado

Humedades cuerpo de prueba [%]				TOTAL GRANDE					TOTAL PEQUEÑO			
P tara (g)	Wt+Wh (g)	Wt+Ws (g)	P tara (g)	Wt+Wh (g)	Wt+Ws (g)	P tara (g)	Wt+Wh (g)	Wt+Ws (g)	P tara (g)	Wt+Wh (g)	Wt+Ws (g)	P tara (g)
18,55	32,54	32,01	3,94	4,2	0,148	0,140	5,933	29578,71	0,079	0,075	5,733	30435,94
19,7	33,22	32,66	4,32									
19,85	31,04	30,58	4,29									
19,02	25,79	25,44	5,45	5,3	0,157	0,146	8,179	21442,98	0,083	0,077	8,366	20875,36
20,05	29,13	28,67	5,34									
18,34	35,52	34,67	5,21									
20,07	33,54	32,43	8,98	8,9	0,159	0,142	11,927	12536,18	0,081	0,071	13,540	9949,46
19,71	38,25	36,77	8,68									
19,73	28,73	27,98	9,09									
22,42	32,4	31,45	10,52	11,1	0,168	0,146	15,258	7779,81	0,094	0,083	14,424	8766,22
20,42	31,07	29,98	11,40									
19,81	35,09	33,53	11,37									
20,31	31,92	30,79	10,78	10,8	0,156	0,136	15,277	7758,65	0,084	0,072	16,089	6906,83
20,06	32,54	31,31	10,93									
19,78	31,2	30,09	10,77									
19,06	31,73	30,38	11,93	11,8	0,164	0,143	15,298	7734,80	0,092	0,077	19,141	4461,21
20,39	31,94	30,73	11,70									
19,63	28,74	27,79	11,64									
22,26	30,85	29,7	15,46	15,0	0,168	0,141	18,697	4753,94	0,082	0,067	23,123	2521,98
19,05	33,99	32,02	15,19									
24,72	39,03	37,22	14,48									
23,50	33,2	31,53	20,80	20,4	0,176	0,143	23,029	2556,35	0,089	0,071	24,754	1996,68
19,04	34,02	31,54	19,84									
20,79	31,92	30,02	20,59									
19,89	30,99	28,5	28,92	28,9	0,175	0,137	27,531	1341,45	0,097	0,073	32,192	688,13
22,77	31,43	29,51	28,49									
18,99	33,53	30,24	29,24									
20,07	32,93	30,33	25,34	26,0	0,173	0,140	23,093	2532,75	0,092	0,076	21,004	3416,28
19,74	33,44	30,54	26,85									
21,28	34,59	31,86	25,80									

Succión total suelo quemado

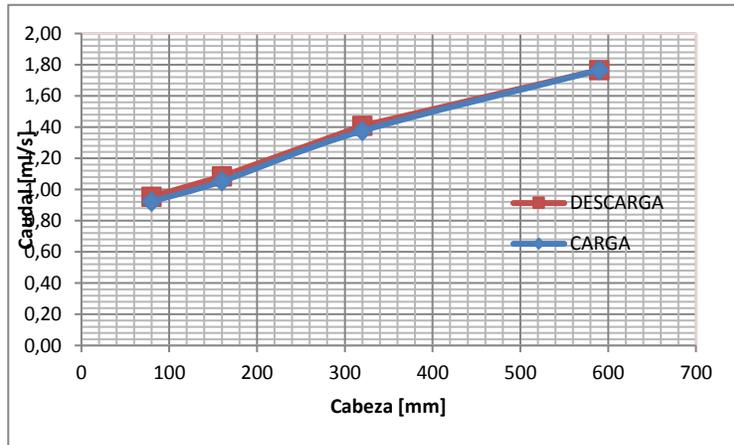
Humedades cuerpo de prueba [%]				TOTAL GRANDE					TOTAL PEQUEÑO			
P tara (g)	Wt+Wh (g)	Wt+Ws (g)	P tara (g)	Wt+Wh (g)	Wt+Ws (g)	P tara (g)	Wt+Wh (g)	Wt+Ws (g)	P tara (g)	Wt+Wh (g)	Wt+Ws (g)	P tara (g)
18,55	32,54	32,01	3,94	4,2	0,149	0,140	6,268	28193,08	0,079	0,073	7,967	22102,97
19,7	33,22	32,66	4,32									
19,85	31,04	30,58	4,29									
19,02	25,79	25,44	5,45	5,3	0,157	0,144	9,173	18596,75	0,084	0,077	9,233	18438,34
20,05	29,13	28,67	5,34									
18,34	35,52	34,67	5,21									
20,07	33,54	32,43	8,98	8,9	0,162	0,143	13,305	10289,85	0,091	0,080	14,268	8964,80
19,71	38,25	36,77	8,68									
19,73	28,73	27,98	9,09									
22,42	32,4	31,45	10,52	11,1	0,167	0,140	19,256	4388,39	0,087	0,073	18,827	4666,34
20,42	31,07	29,98	11,40									
19,81	35,09	33,53	11,37									
20,31	31,92	30,79	10,78	10,8	0,169	0,142	19,111	4479,91	0,085	0,071	19,464	4259,29
20,06	32,54	31,31	10,93									
19,78	31,2	30,09	10,77									
19,06	31,73	30,38	11,93	11,8	0,159	0,133	19,069	4507,17	0,085	0,071	18,794	4688,39
20,39	31,94	30,73	11,70									
19,63	28,74	27,79	11,64									
22,26	30,85	29,7	15,46	15,0	0,173	0,140	23,429	2414,03	0,087	0,071	22,394	2799,44
19,05	33,99	32,02	15,19									
24,72	39,03	37,22	14,48									
23,50	33,2	31,53	20,80	20,4	0,190	0,144	31,302	781,66	0,095	0,073	31,087	806,14
19,04	34,02	31,54	19,84									
20,79	31,92	30,02	20,59									
19,89	30,99	28,5	28,92	28,9	0,224	0,141	58,286	46,92	0,112	0,071	57,910	47,68
22,77	31,43	29,51	28,49									
18,99	33,53	30,24	29,24									
20,07	32,93	30,33	25,34	26,0	0,205	0,141	46,088	94,04	0,104	0,070	48,424	74,31
19,74	33,44	30,54	26,85									
21,28	34,59	31,86	25,80									

10. Pinhole test

Pinhole 1 suelo natural

Cabeza Hidráulica [mm]	Volumen [ml]	TIEMPO [s]						Caudal Carga [ml/s]	Caudal Descarga [ml/s]
		Carga		Promedio Carga	Descarga		Promedio Descarga		
80	10	10,91	10,78	10,845	10,03	10,05	10,04	0,922	0,996
	25	28,73	28,22	28,475	24,05	24,13	24,09	0,878	1,038
	50	55,69	56,02	55,855	47,75	47,72	47,735	0,895	1,047
	100	102,02	199,84	150,93	89,06	89,1	89,08	0,663	1,123
160	10	8,22	8,19	8,205	7,75	7,47	7,61	1,219	1,314
	25	19,84	19,56	19,7	18,19	18	18,095	1,269	1,382
	50	39,53	39,69	39,61	36,13	35,84	35,985	1,262	1,389
	100	74,87	73,69	74,28	66,35	66,35	66,35	1,346	1,507
320	10	5,84	5,82	5,83	5,81	5,31	5,56	1,715	1,799
	25	14,62	14,54	14,58	12,81	13,01	12,91	1,715	1,936
	50	28,94	28,81	28,875	26,66	26,66	26,66	1,732	1,875
	100	54,22	53,87	54,045	48,69	47,88	48,285	1,850	2,071
590	10	4,28	4,08	4,18				2,392	
	25	10,31	10,41	10,36				2,413	
	50	20,84	20,82	20,83				2,400	
	100	38,56	38,08	38,32				2,610	

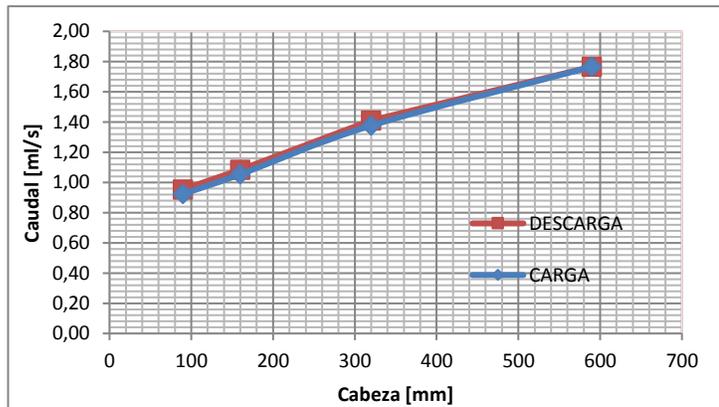
CABEZA	CAUDAL PROMEDIO CARGA	DESCARGA CAUDAL PROMEDIO
80	0,84	1,05
160	1,27	1,40
320	1,75	1,92
590	2,45	2,45



Pinhole 2 suelo natural

Cabeza Hidráulica [mm]	Volumen [ml]	TIEMPO [s]						Caudal Carga [ml/s]	Caudal Descarga [ml/s]
		Carga		Promedio Carga	Descarga		Promedio Descarga		
90	10	10,51	10,65	10,58	10,58	10,45	10,515	0,95	0,95
	25	27,24	27,03	27,135	25,96	25,32	25,64	0,92	0,98
	50	55,13	55,62	55,375	53,7	53,26	53,48	0,90	0,93
160	10	9,75	9,62	9,685	9,48	9,36	9,42	1,03	1,06
	25	23,49	23,05	23,27	22,65	22,36	22,505	1,07	1,11
	50	47,33	47,65	47,49	46,14	46,52	46,33	1,05	1,08
320	10	7,41	7,48	7,445	7,31	7,22	7,265	1,34	1,38
	25	18,32	18,01	18,165	17,56	17,72	17,64	1,38	1,42
	50	35,36	35,62	35,49	34,78	34,96	34,87	1,41	1,43
590	10	6,8	6,75	6,775				1,48	
	25	13,5	13,26	13,38				1,87	
	50	25,6	25,6	25,6				1,95	

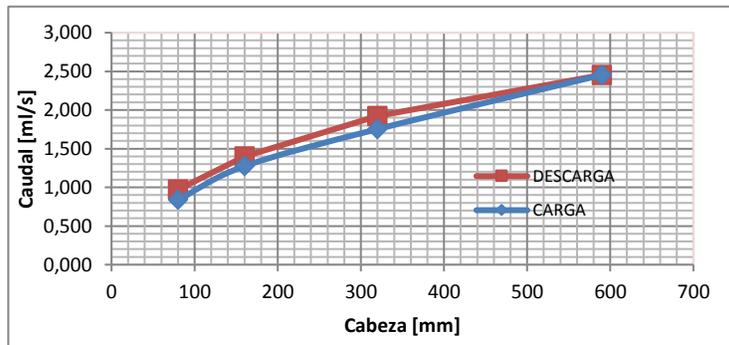
CABEZA	CAUDAL PROMEDIO CARGA	DESCARGA CAUDAL PROMEDIO
90	0,92	0,95
160	1,05	1,08
320	1,38	1,41
590	1,77	1,77



Pinhole 3 suelo natural

Cabeza Hidráulica [mm]	Volumen [ml]	TIEMPO [s]						Caudal Carga [ml/s]	Caudal Descarga [ml/s]
		Carga		Promedio Carga	Descarga		Promedio Descarga		
80	10	10,91	10,78	10,845	11,03	11,05	11,04	0,922	0,906
	25	28,73	28,22	28,475	26,05	26,13	26,09	0,878	0,958
	50	55,69	56,02	55,855	51,75	51,72	51,735	0,895	0,966
	100	102,02	199,84	150,93	95,06	95,1	95,08	0,663	1,052
160	10	8,22	8,19	8,205	7,75	7,47	7,61	1,219	1,314
	25	19,84	19,56	19,7	18,19	18	18,095	1,269	1,382
	50	39,53	39,69	39,61	36,13	35,84	35,985	1,262	1,389
	100	74,87	73,69	74,28	66,35	66,35	66,35	1,346	1,507
320	10	5,84	5,82	5,83	5,81	5,31	5,56	1,715	1,799
	25	14,62	14,54	14,58	12,81	13,01	12,91	1,715	1,936
	50	28,94	28,81	28,875	26,66	26,66	26,66	1,732	1,875
	100	54,22	53,87	54,045	48,69	47,88	48,285	1,850	2,071
590	10	4,28	4,08	4,18				2,392	
	25	10,31	10,41	10,36				2,413	
	50	20,84	20,82	20,83				2,400	
	100	38,56	38,08	38,32				2,610	

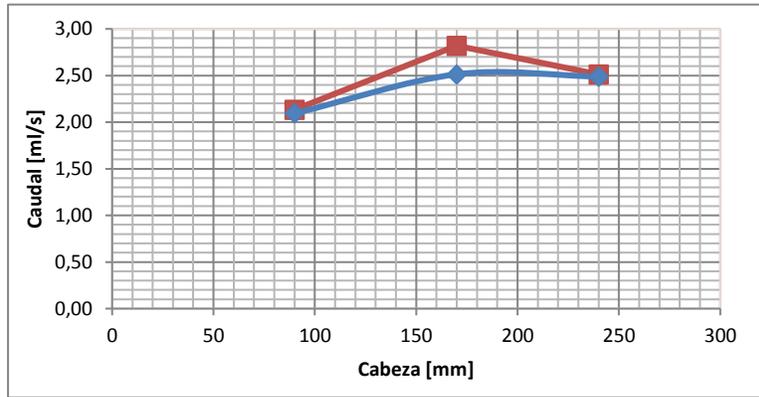
CABEZA	CAUDAL PROMEDIO CARGA	DESCARGA CAUDAL PROMEDIO
80	0,839	0,971
160	1,274	1,398
320	1,753	1,920
590	2,454	2,454



Pinhole 1 suelo quemado

Cabeza Hidráulica [mm]	Volumen [ml]	TIEMPO [s]						Caudal Carga [ml/s]	Caudal Descarga [ml/s]
		Carga		Promedio Carga	Descarga		Promedio Descarga		
90	10	5,02	5,12	5,07	4,88	4,79	4,835	1,972	2,068
	25	11,29	12,01	11,65	11,59	11,72	11,655	2,146	2,145
	50	23,54	23,91	23,725	23,45	23,15	23,3	2,107	2,146
	100	46,58	46,38	46,48	45,9	46,01	45,955	2,151	2,176
170	10	4,23	4,26	4,245	4,68	4,99	4,835	2,356	2,068
	25	9,76	9,71	9,735	10,5	11,11	10,805	2,568	2,314
	50	19,75	19,59	19,67	21,15	21,51	21,33	2,542	2,344
	100	38,56	38,75	38,655	21,89	22,05	21,97	2,587	4,552
240	10	4,63	4,29	4,46				2,242	
	25	9,69	9,62	9,655				2,589	
	50	19,52	19,58	19,55				2,558	
	100	39,01	38,95	38,98				2,565	

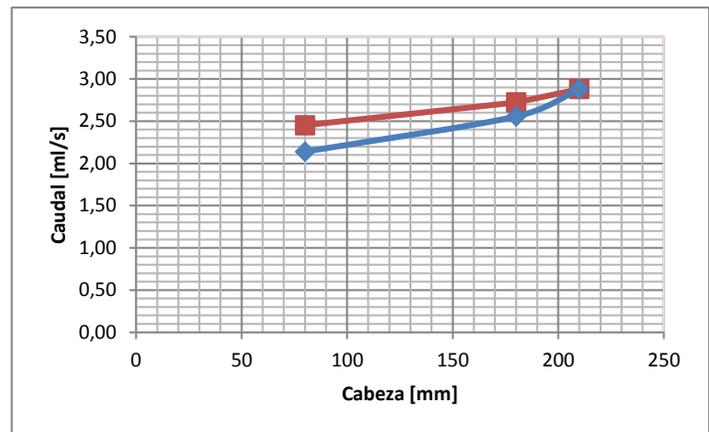
CABEZA	CAUDAL PROMEDIO CARGA	CAUDAL PROMEDIO DESCARGA
90	2,09	2,13
170	2,51	2,82
240	2,49	2,49



Pinhole 2 suelo quemado

Cabeza Hidráulica [mm]	Volumen [ml]	TIEMPO [s]						Caudal Carga [ml/s]	Caudal Descarga [ml/s]
		Carga		Promedio Carga	Descarga		Promedio Descarga		
80	10	5,01	5,22	5,115	3,18	3,09	3,135	1,955	3,190
	25	10,29	11,01	10,65	11,59	11,72	11,655	2,347	2,145
	50	23,11	23,41	23,26	23,45	23,15	23,3	2,150	2,146
	100	47,58	47,38	47,48	42,9	43,01	42,955	2,106	2,328
180	10	4,03	4,06	4,045	3,68	3,99	3,835	2,472	2,608
	25	9,56	9,51	9,535	10,5	10,11	10,305	2,622	2,426
	50	19,75	19,59	19,67	21,15	21,51	21,33	2,542	2,344
	100	38,56	38,75	38,655	28,89	28,05	28,47	2,587	3,512
210	10	3,63	3,29	3,46				2,890	
	25	8,69	8,62	8,655				2,889	
	50	17,52	17,58	17,55				2,849	
	100	34,58	34,65	34,615				2,889	

CABEZA	CAUDAL PROMEDIO CARGA	DESCARGA CAUDAL PROMEDIO
80	2,14	2,45
180	2,56	2,72
210	2,88	2,88
0		



11. Desagregación

	Muestras Naturales	Muestras quemadas
Nivel a 1/3		
Nivel a 2/3		
Completamente cubiertos		
Pasados 24 horas		

12. Inderbitzen

INDERBITZEN			
	MUESTRA	PERDIDA	UNIDAD
TARA	Natural 1	701,61	gramos
	Natural 2	646,15	gramos
	Quemado 1	704,04	gramos
	Quemado 2	628,59	gramos
TARA Y SUELO	Natural 1	701,83	gramos
	Natural 2	652,9	gramos
	Quemado 1	704,38	gramos
	Quemado 2	645	gramos
SUELO	Natural 1	0,22	gramos
	Natural 2	6,75	gramos
	Quemado 1	0,34	gramos
	Quemado 2	16,41	gramos
TOTAL NATURAL		6,97	gramos
TOTAL QUEMADO		16,75	gramos
DIAMETRO	10,0	cm	
EROSIÓN NATURAL	0,089	gramos/cm ²	
EROSIÓN QUEMADO	0,213	gramos/cm ²	

13. Cortes directos

Corte directo en suelo natural Ensayo 1 (Primeros 3 puntos)

Microsoft
Direct Shear Test

Date

 Checked By

 Date

 Date

 Tested By

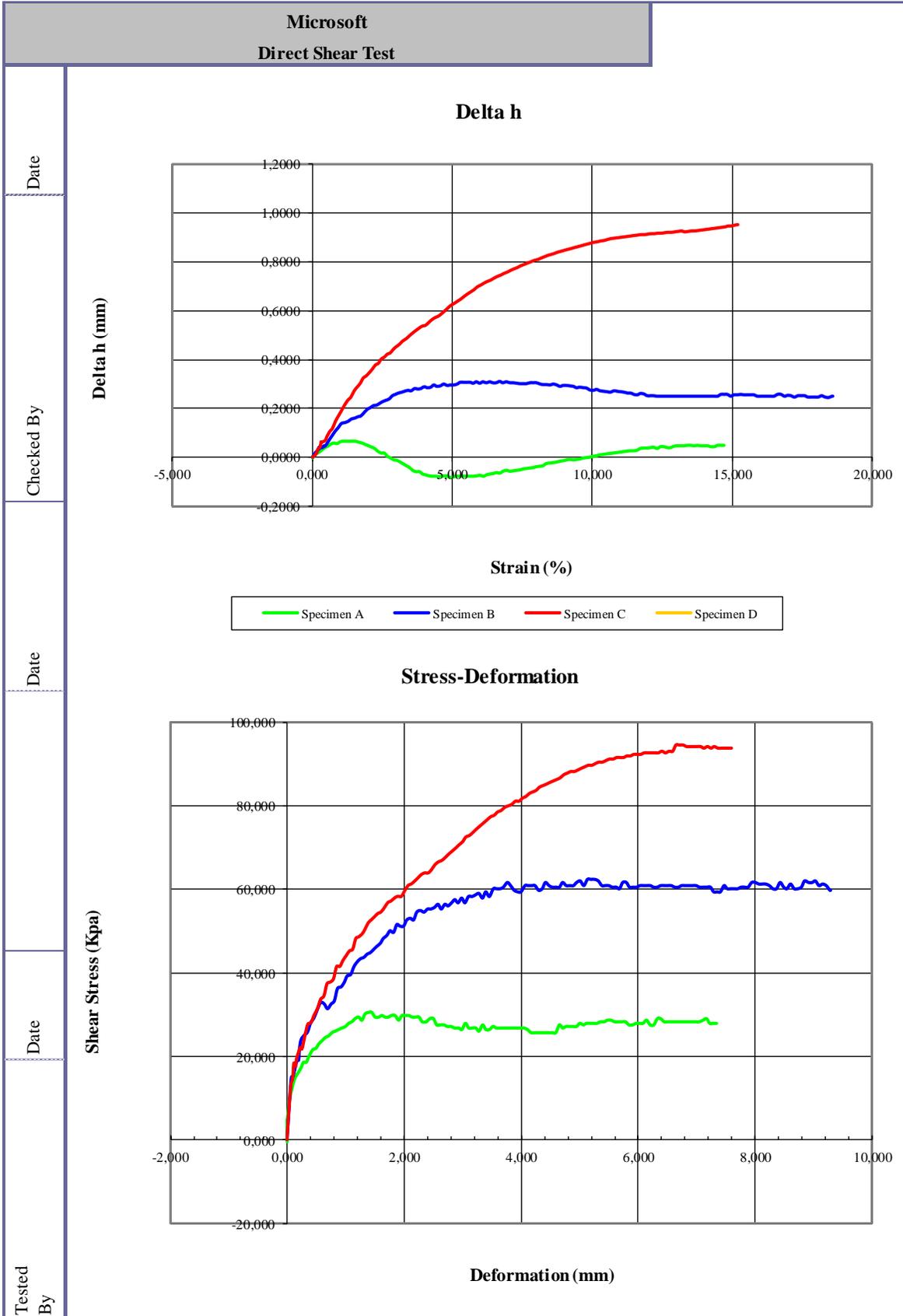
Peak: $\Phi = 38,4$ $C = 19,621$

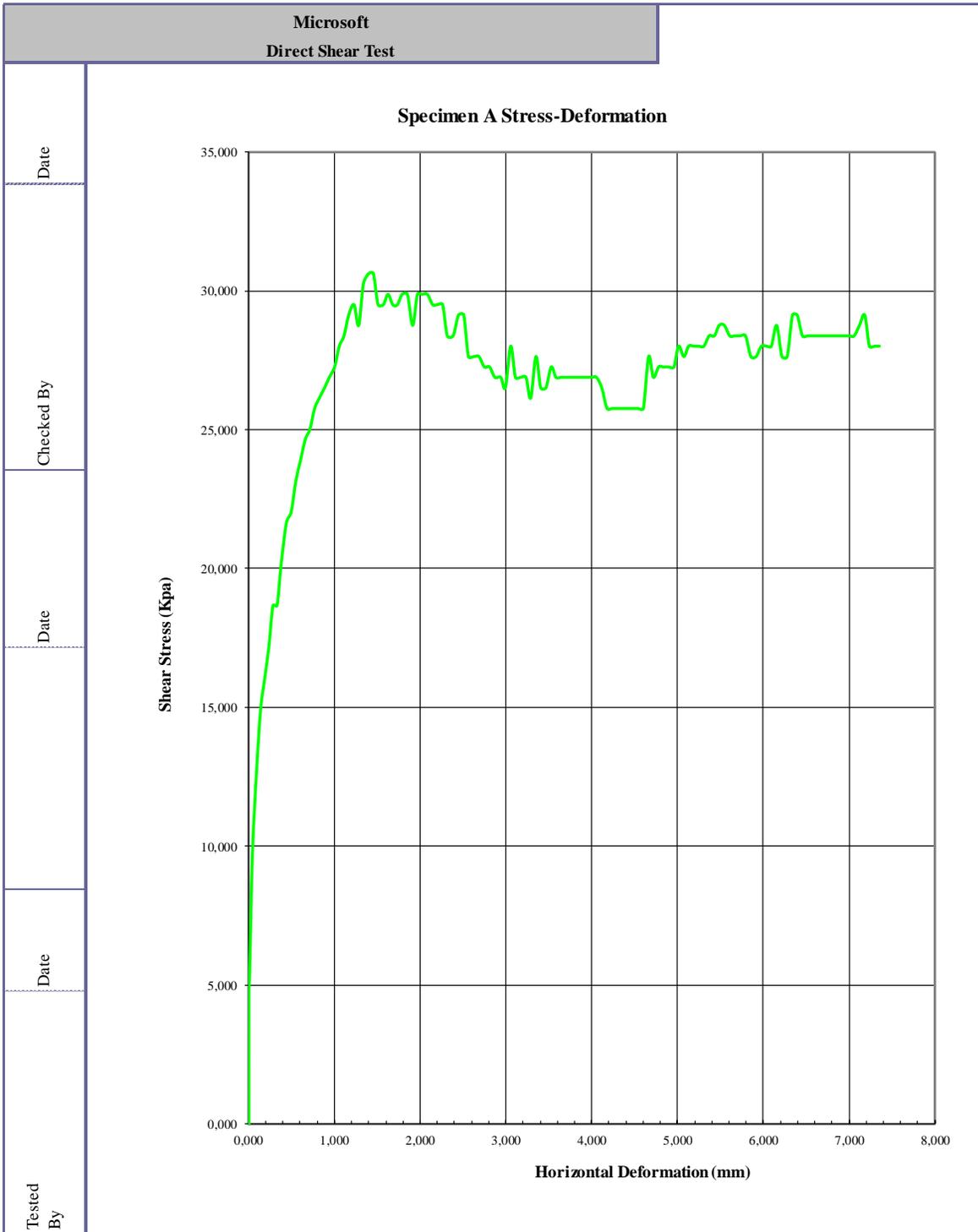
Specimen				
Initial	A	B	C	D
Moisture (%)	23,53	24,47	25,67	
Density (g/cm3)	1,25	1,35	1,20	
Void Ratio	1,123	0,970	1,211	
Saturation (%)	55,51	66,85	56,17	
Diameter (mm)	49,970	49,970	49,970	
Height (mm)	25,370	25,370	25,370	

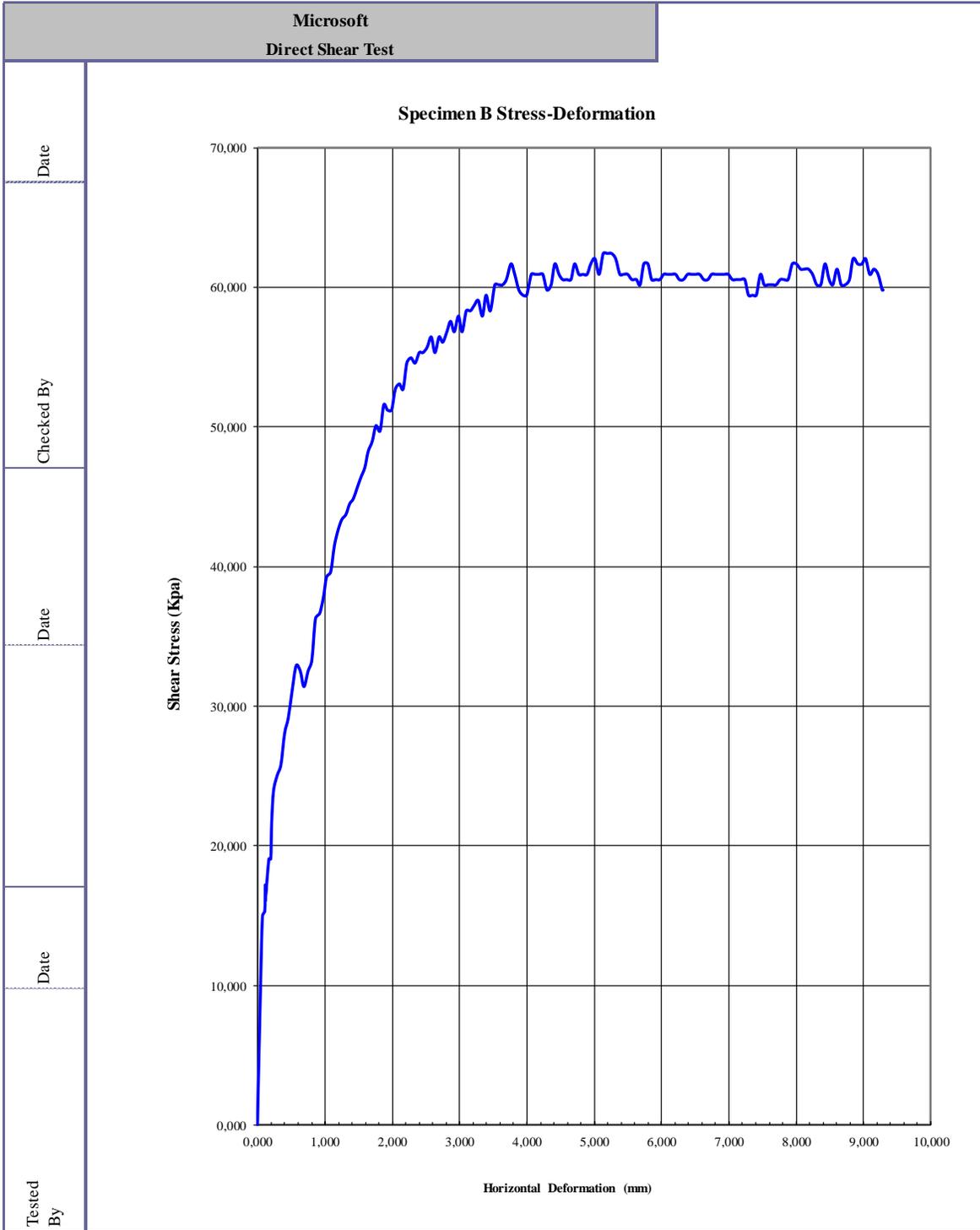
Final				
A	B	C	D	
Moisture (%)	39,45	33,27	37,25	
Density (g/cm3)	-1,38	-1,45	-1,41	
Void Ratio	-2,914	-2,829	-2,884	
Saturation (%)	-35,34	-30,71	-33,72	
Diameter (mm)	49,970	49,970	49,970	
Height (mm)	25,955	25,955	25,955	
Normal Stress (Kpa)	25,0	50,0	100,0	
Peak Stress (Kpa)	30,6	62,4	94,5	
Residual Stress (Kpa)	28,0	59,8	93,7	
Strain (%)	14,705	18,580	13,555	
Rate (mm/min)	0,06	0,06	0,06	

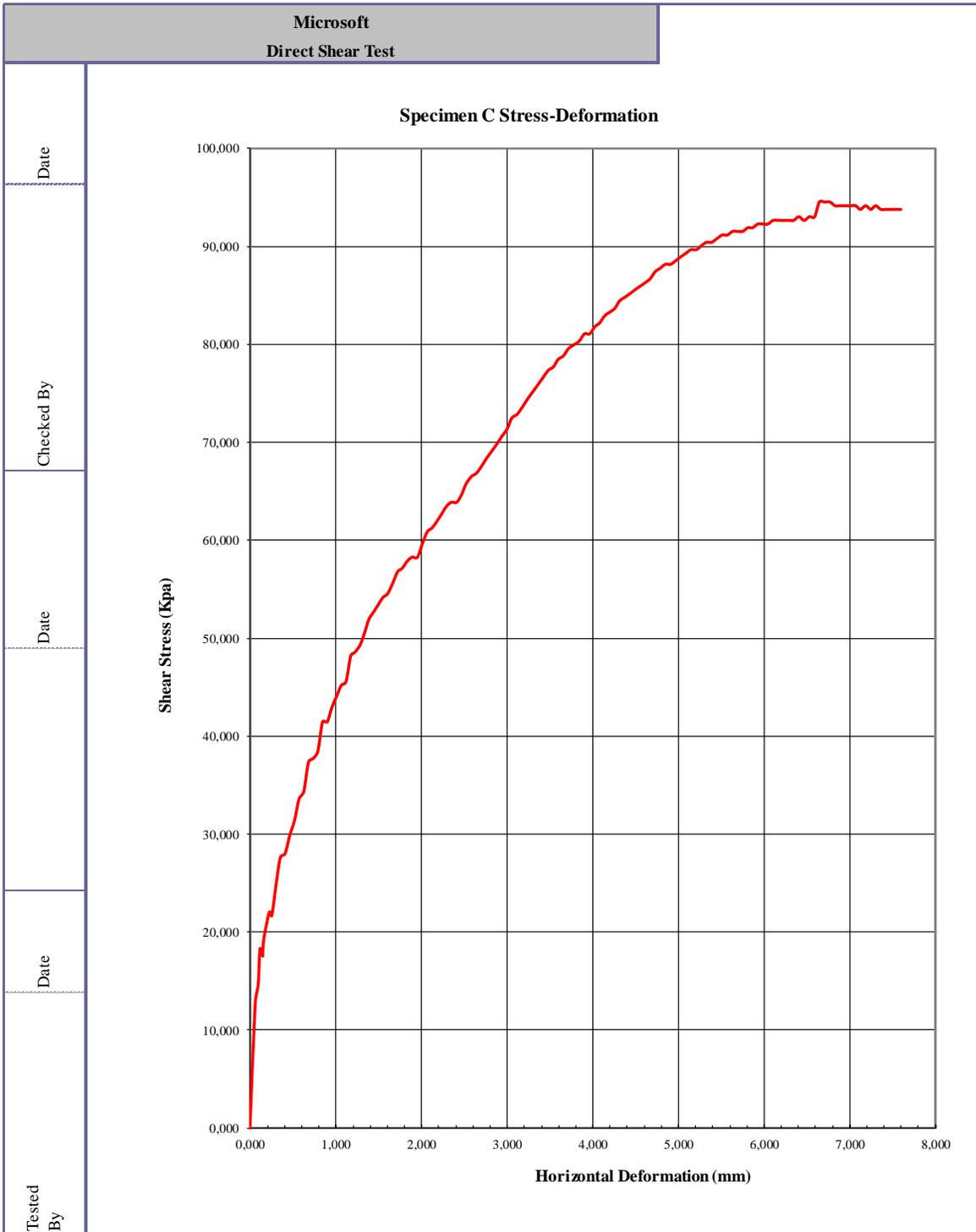
Project Date				
Date				
	N/A	N/A	N/A	N/A

Project: _____ Location: _____ Project Number: _____ Boring Number: _____ Sample Number: _____ Depth: 0 Sample Type: Undisturbed Description: _____ Test Type: Direct Shear Remarks: _____	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 25%; height: 20px;"> </td> </tr> <tr> <td colspan="4" style="text-align: center; padding: 5px;">Failure Photographs</td> </tr> </table>					Failure Photographs			
Failure Photographs									









Corte directo en suelo natural Ensayo 2 (3 puntos adicionales)

Microsoft
Direct Shear Test

Date

Peak: Phi = 28,5 C = 33,941

Square Grid

Checked By

Date

Date

Specimen				
Initial	A	B	C	D
Moisture (%)	20,79	21,51	22,87	
Density (g/cm3)	1,28	1,31	1,30	
Void Ratio	1,066	1,020	1,042	
Saturation (%)	51,66	55,87	58,16	
Diameter (mm)	49,970	49,970	49,970	
Height (mm)	25,370	25,370	25,370	

Date

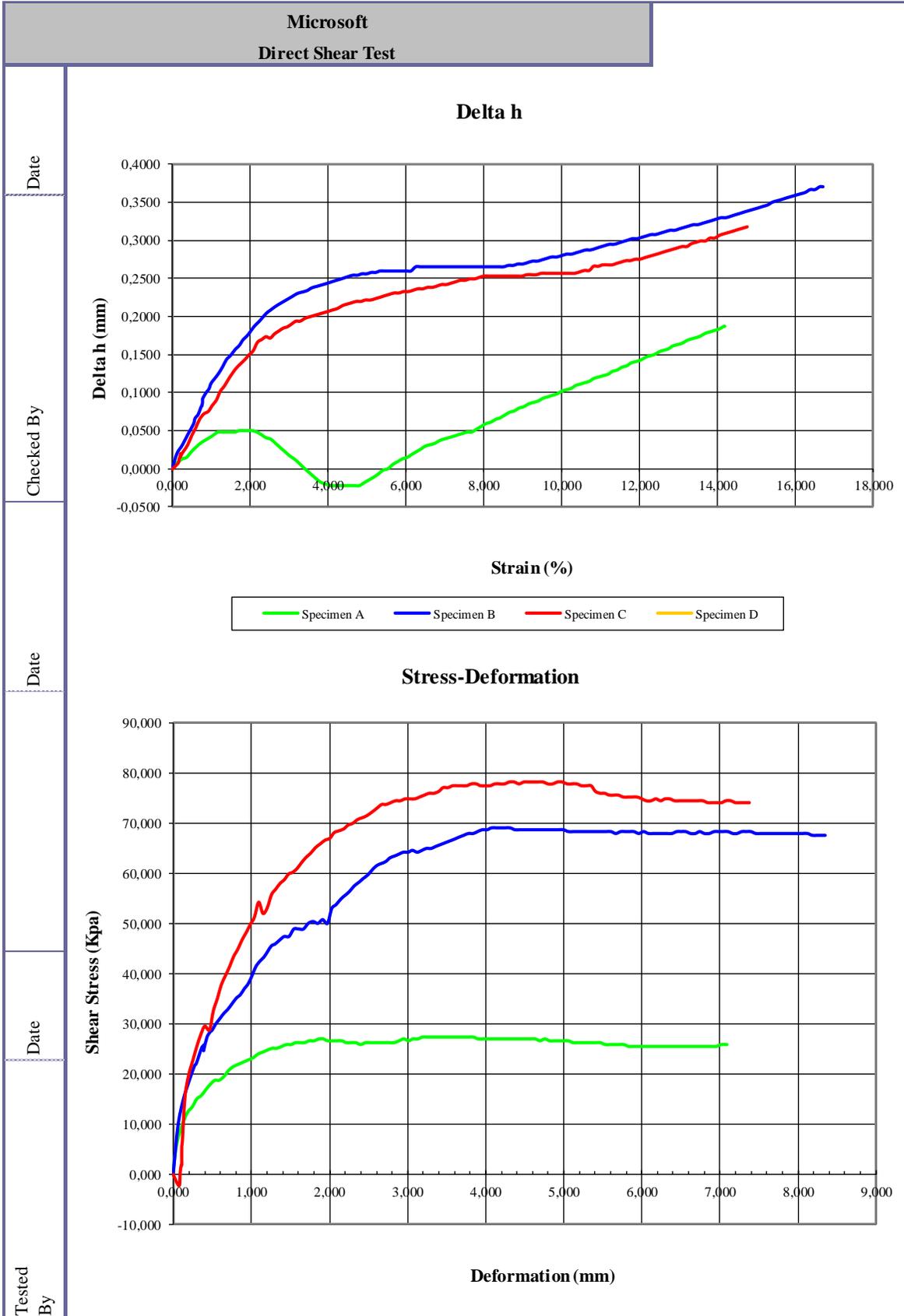
Date

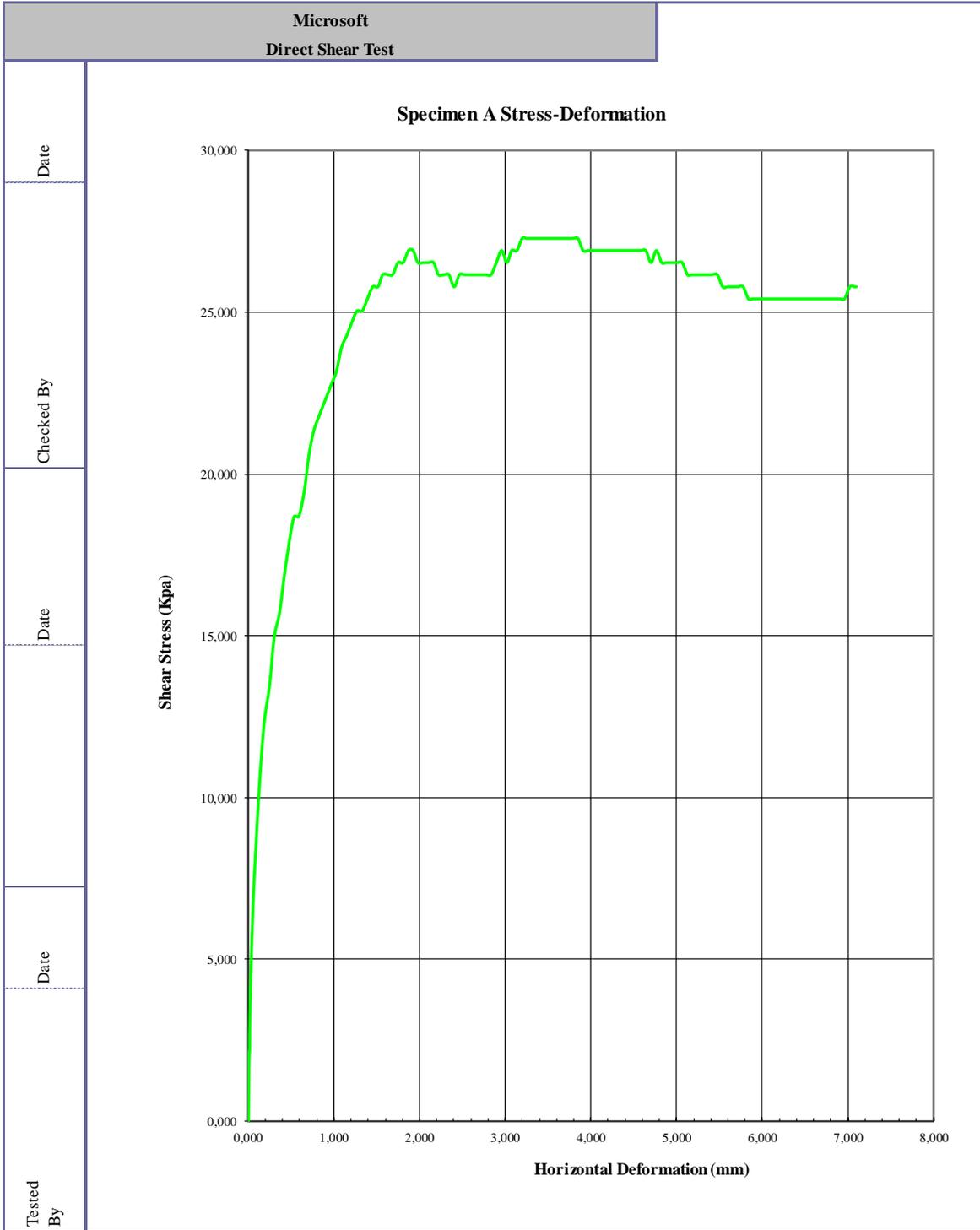
Date

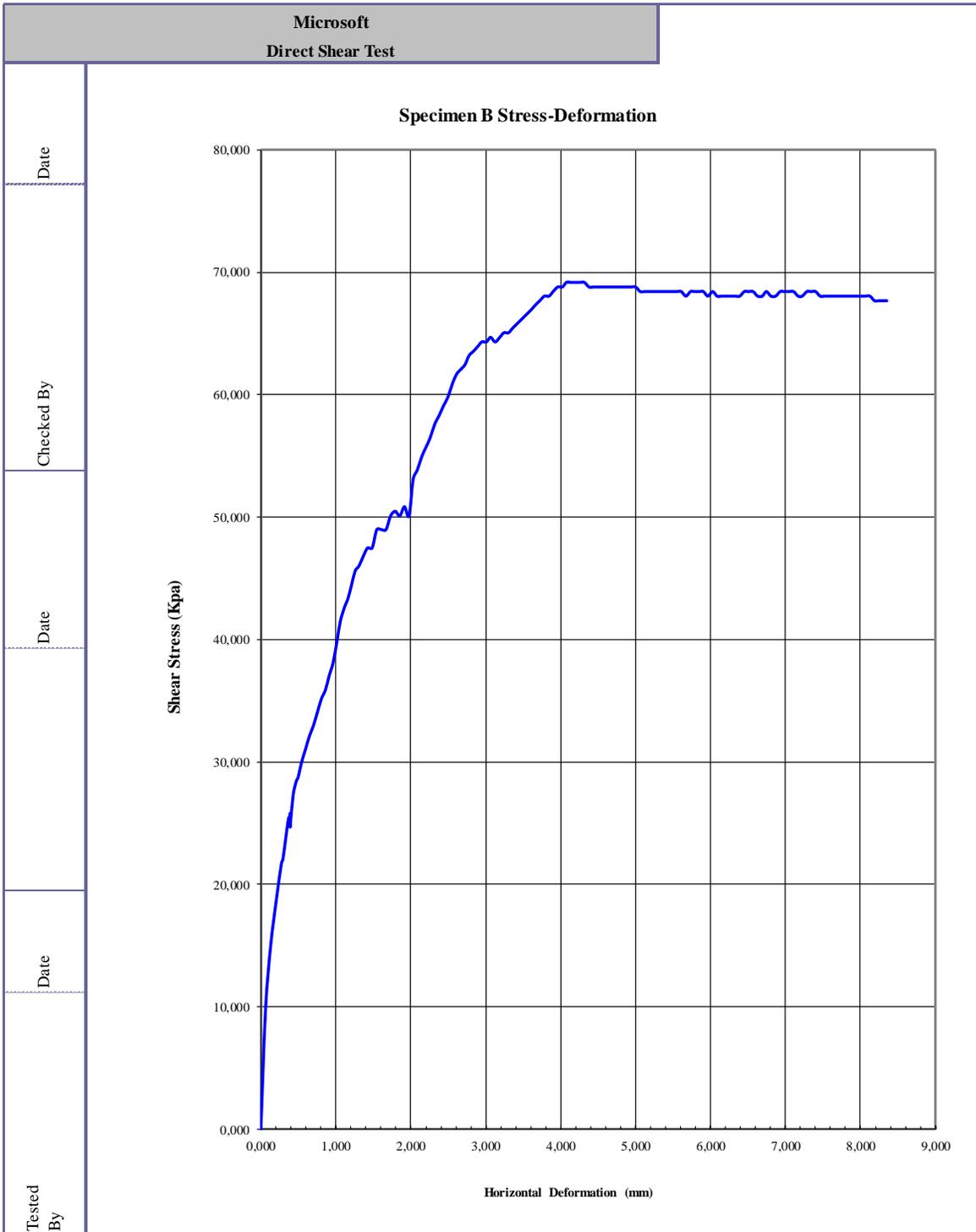
Tested By

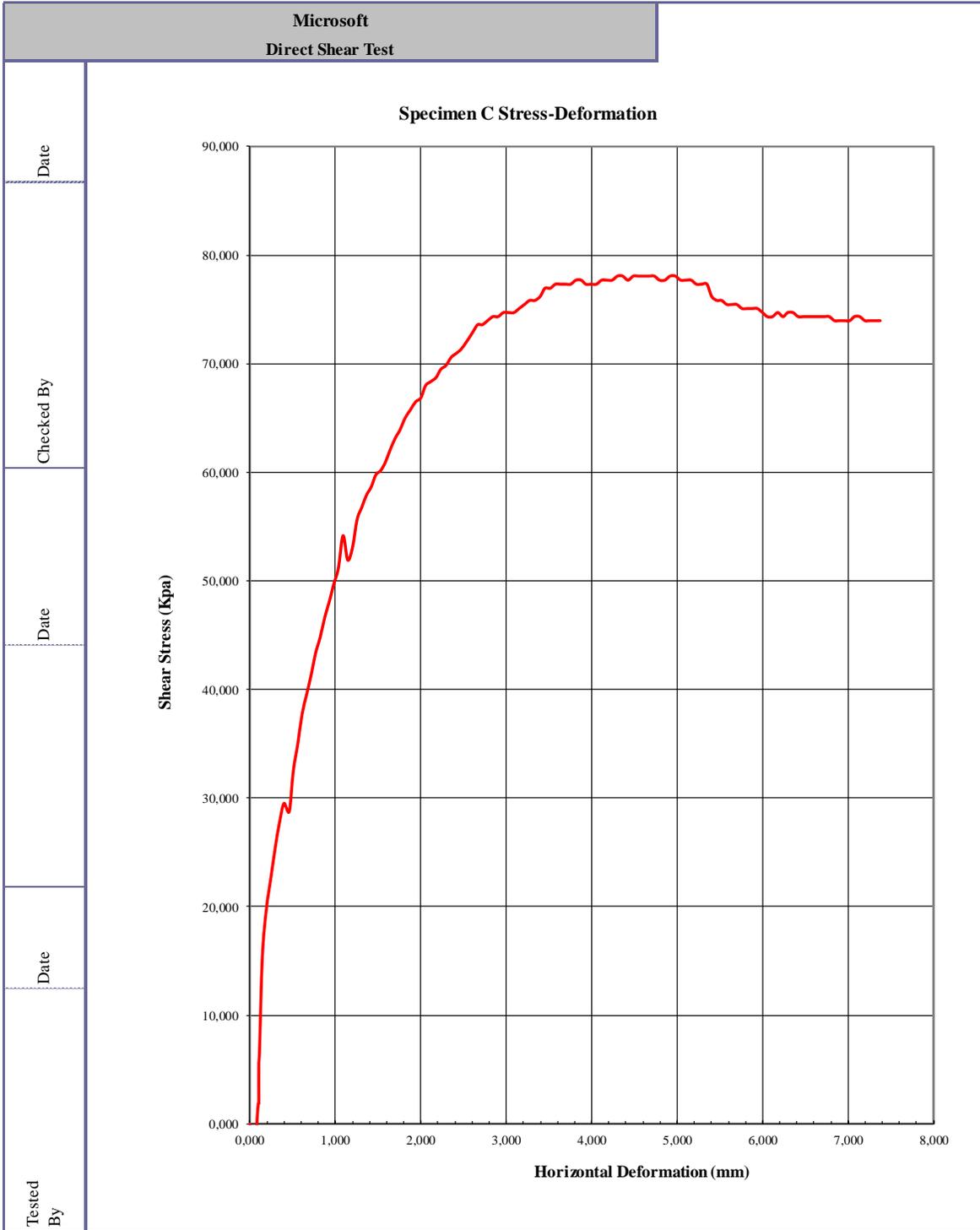
Project Date				
Date				
Project:				
Location:				
Project Number:	N/A	N/A	N/A	N/A
Boring Number:				
Sample Number:				
Depth:	0			
Sample Type:	Undisturbed	Failure Photographs		
Description:				
Test Type:	Direct Shear			
Remarks:				

Date









Corte directo en suelo quemado Ensayo 1 (Primeros 3 puntos)

Microsoft
Direct Shear Test

Date

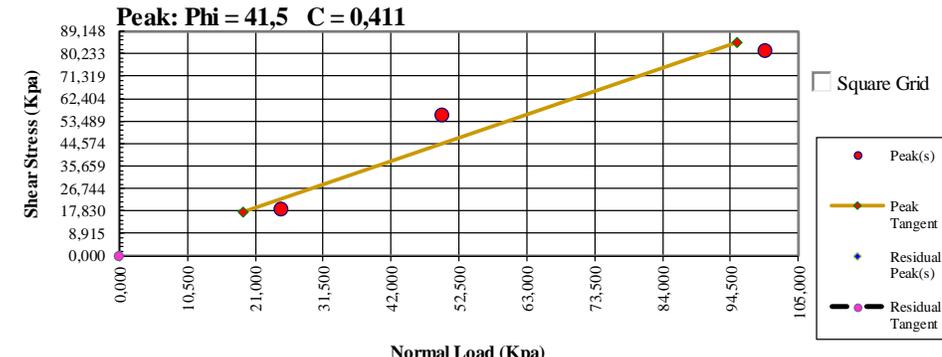
 Checked By

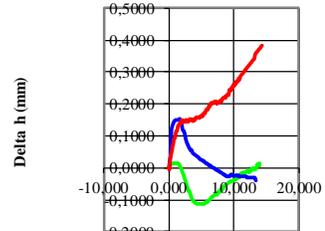
 Date

 Date

 Tested By

Peak: $\Phi = 41,5$ $C = 0,411$



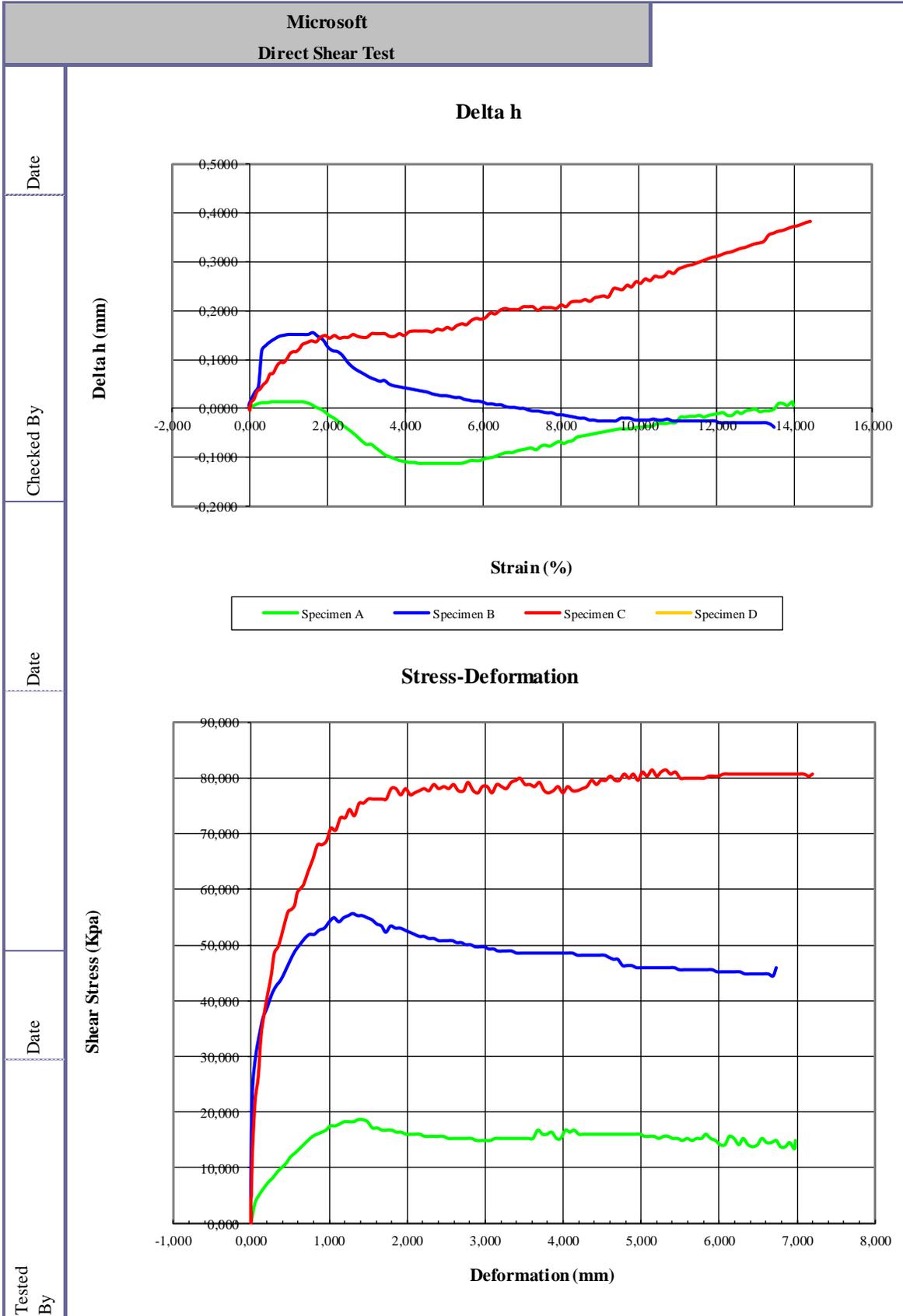


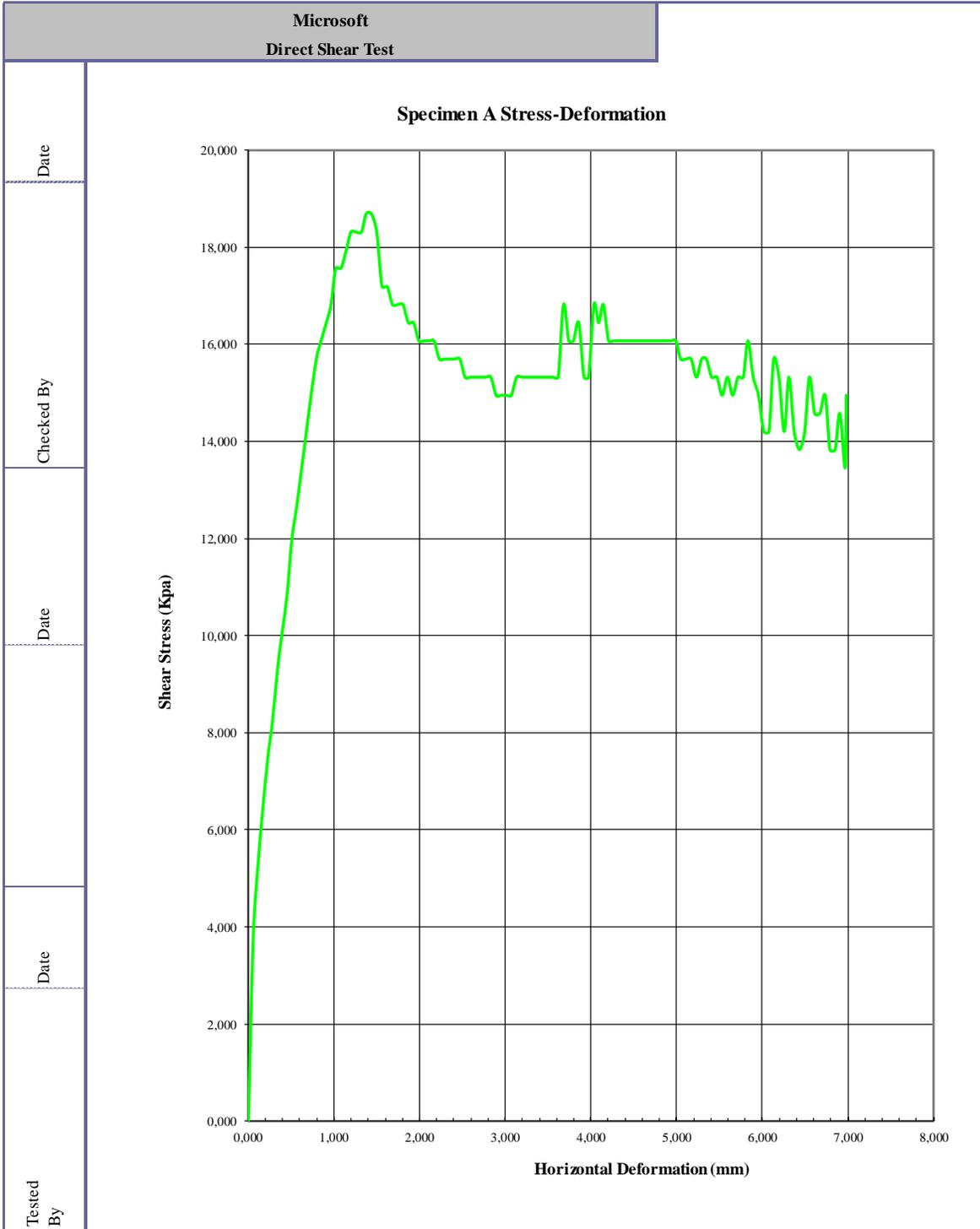
Specimen				
Initial	A	B	C	D
Moisture (%)	16,75	17,02	17,02	
Density (g/cm3)	1,29	1,27	1,34	
Void Ratio	1,056	1,092	0,981	
Saturation (%)	42,05	41,31	45,98	
Diameter (mm)	49,970	49,970	49,970	
Height (mm)	25,370	25,370	25,370	

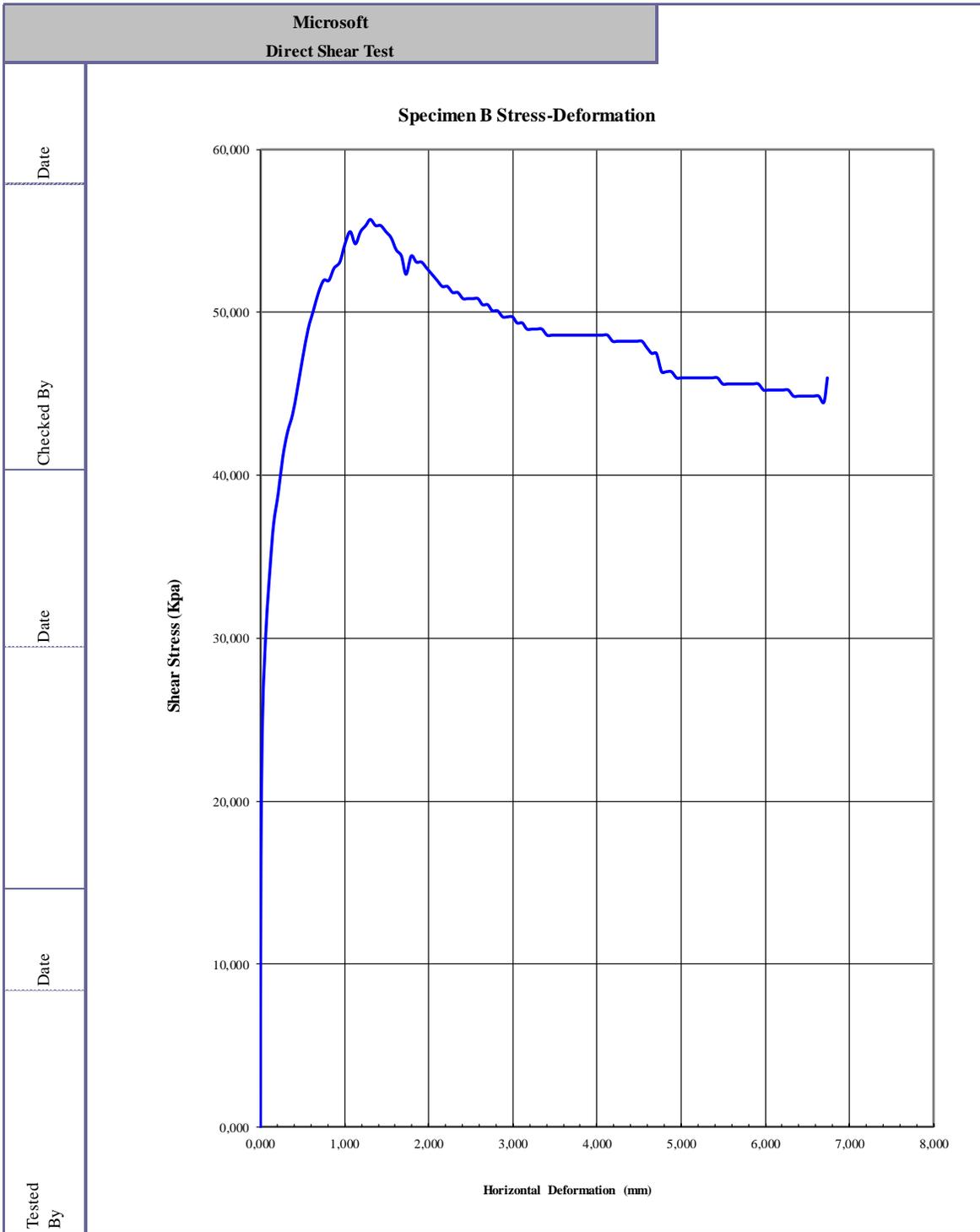
Final	A	B	C	D
Moisture (%)	33,06	35,23	35,82	
Density (g/cm3)	-1,45	-1,43	-1,42	
Void Ratio	-2,826	-2,855	-2,863	
Saturation (%)	-30,59	-31,99	-31,90	
Diameter (mm)	49,970	49,970	49,970	
Height (mm)	25,902	26,234	26,893	
Normal Stress (Kpa)	25,0	50,0	100,0	
Peak Stress (Kpa)	18,7	55,7	81,5	
Residual Stress (Kpa)	14,9	46,0	80,7	
Strain (%)	13,979	13,486	14,418	
Rate (mm/min)	0,06	0,06	0,06	

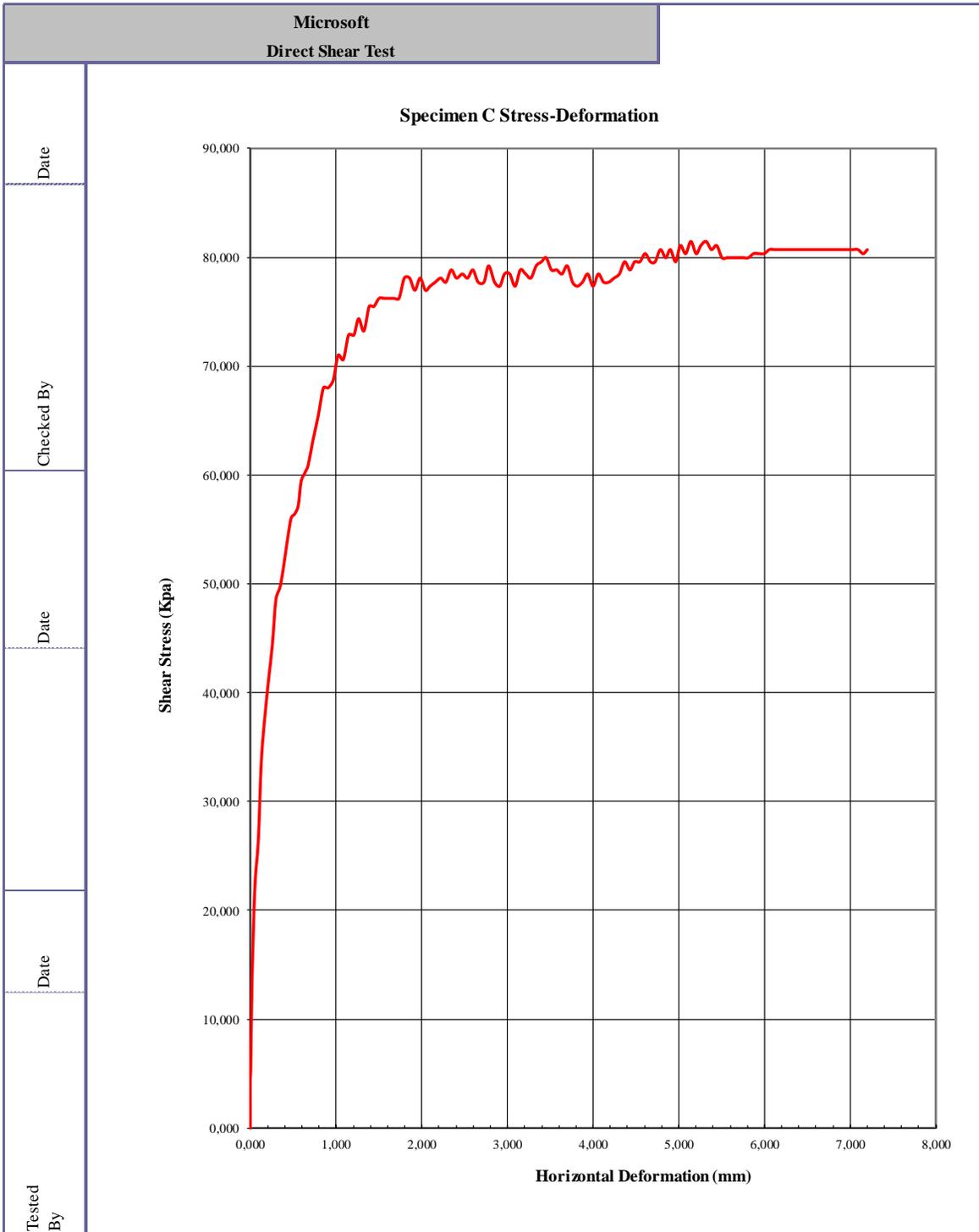
Project Date				
Date				
	N/A	N/A	N/A	N/A

Project:				
Location:				
Project Number:				
Boring Number:				
Sample Number:				
Depth:	0			
Sample Type:	Undisturbed	Failure Photographs		
Description:				
Test Type:	Direct Shear			
Remarks:				









Corte directo en suelo quemado Ensayo 2 (2 puntos adicionales)

Microsoft

Direct Shear Test

Date

Checked By

Date

Specimen				
Initial	A	B	C	D
Moisture (%)	17,02	17,50		
Density (g/cm3)	1,35	1,32		
Void Ratio	0,967	1,001		
Saturation (%)	46,63	46,34		
Diameter (mm)	49,970	49,970		
Height (mm)	25,370	25,370		

Date

Date

Final	A	B	C	D
Moisture (%)	34,77	32,04		
Density (g/cm3)	-1,43	-1,46		
Void Ratio	-2,849	-2,811		
Saturation (%)	-32,27	-30,48		
Diameter (mm)	49,970	49,970		
Height (mm)	25,460	25,004		
Normal Stress (Kpa)	25,0	50,0		
Peak Stress (Kpa)	30,3	46,3		
Residual Stress (Kpa)	23,9	41,5		
Strain (%)	16,334	7,380		
Rate (mm/min)	0,06	0,06		

Date

Project Date				
Date				
Project:				
Location:				
Project Number:				
Boring Number:				
Sample Number:				
Depth:	0			
Sample Type:	Undisturbed			
Description:				
Test Type:	Direct Shear			
Remarks:				

