



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**DETERMINACIÓN DE LA ERODABILIDAD DE UN SUELO SUPERFICIAL
DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO MEDIANTE ENSAYO INDERBITZEN**

Melissa Montoya Ruiz

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Medellín, Colombia

2022

DETERMINACIÓN DE LA ERODABILIDAD DE UN SUELO SUPERFICIAL DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO MEDIANTE ENSAYO INDERBITZEN

Melissa Montoya Ruiz

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
Faculta de Minas, Área curricular Ingeniería Civil
Medellín, Colombia
2022

Dedicatoria

A la Melissa del 2019

A mis padres y hermanos

Agradecimientos

Si algo me ha demostrado este proceso, es que muchas veces no somos lo que sabemos ni lo que hacemos, sino cómo nos sentimos y la conexión que generamos con las personas que elegimos. Confiar en uno mismo se torna menos complicado cuando alguien se encarga de recordarte esas capacidades y valor que en el proceso pueden olvidarse. Por eso esta sección quiero dedicarla a todos aquellos que confiaron en mí y me recordaron que era capaz.

Le agradezco a mi papá Franki, mi mamá Lina María, mi hermana Paulina y a mi hermano Cristian por apoyarme en cada proyecto y tener la completa certeza de que tendré éxito. Sin su apoyo constante y su disposición de ayuda, esto no habría sido posible. Agradezco también a mis abuelas, tíos y tías, quienes con sus oraciones y mensajes me enviaron siempre la mejor energía.

Agradezco, especialmente a mi directora, la docente Yamile Valencia González y a mi codirector Oscar Echeverri por haberme guiado en este proceso, por tenerme paciencia y brindarme siempre dos elementos completamente valiosos: su conocimiento y su tiempo. A mi colega el Ingeniero Daniel Hernández, por su compañía en este proceso, sus aportes a mi investigación y por su apoyo incondicional y constante.

Quiero agradecer también a mis hermanas con las que no comparto sangre, Mariana, Manuela, María Isabel y Laura. Su constante compañía, apoyo, amor y contención fueron un ingrediente fundamental para la culminación de este proceso.

Gracias a mis amigos del alma Javier y Juan José, por aportar su conocimiento y apoyo en actividades que me hubiera sido difícil ejecutar sin su ayuda. Les agradezco además por sus palabras oportunas y consejos objetivos que me ayudaron a crecer en este proceso.

También, a mis compañeras y amigas Keyla, Ángela y Daniela, por su colaboración en la realización de ensayos y asesorías que enriquecieron esta investigación. Por sus palabras de aliento, compañerismo y por hacer más amenos los momentos de trabajo.

Al laboratorio de Geotecnia y Pavimentos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín; por brindarme el espacio y los implementos para la ejecución de los ensayos que conforman mi investigación.

Resumen

Durante los últimos años los procesos erosivos se han incrementado en el país como respuesta a las variaciones ambientales y a las acciones antrópicas, como el aumento desmedido de los grandes centros urbanos y sus necesidades de consumo. Esta situación genera consecuencias que no solo afectan la estabilidad de los terrenos, sino que también afectan de manera negativa áreas como la agricultura.

Bajo este contexto se hace necesario establecer medidas de mitigación y remediación para los terrenos susceptibles a la erosión. Sin embargo, actualmente las metodologías que se emplean para la medición directa de la erodabilidad de los suelos de la región son escasas o su implementación resulta costosa. Por esta razón es necesario implementar ensayos de medición directa de la erodabilidad que han funcionado de manera efectiva en otros países, como es el caso del ensayo Inderbitzen.

El estudio presentado a continuación fue desarrollado sobre un suelo con características de ceniza volcánica, localizado en un talud sin cobertura vegetal en la vereda Alto de la Virgen, del Municipio de Guarne, Departamento de Antioquia. Las muestras recuperadas fueron sometidas a una campaña de ensayos del laboratorio, los cuales incluían pruebas de caracterización física, química, mineralogía, estructural e hidro/mecánica; así como ensayos de Inderbitzen.

De la batería de ensayos ejecutados se pudo concluir que la pérdida de suelo aumenta conforme se aplican caudales mayores. De igual manera esta pérdida aumenta cuando se incrementa la pendiente de la rampa. Sin embargo, el factor que mayor influencia tiene en la cantidad de suelo arrastrado es la magnitud del caudal.

Se observa además que la clasificación cualitativa de la erodabilidad del suelo obtenida mediante el ensayo Inderbitzen coincide con la indicada por la Ecuación Universal de pérdida de suelo (USLE) por lo que se considera que la implementación del equipo conlleva a resultados satisfactorios con respecto a la metodología más usada a nivel internacional. También se verifica el nivel de erodabilidad obtenido mediante correlaciones

con propiedades físicas, químicas y mineralógicas, evidenciando que dichas expresiones requieren de ajustes que permitan un mayor acercamiento a los resultados obtenidos mediante Inderbitzen.

Con el objetivo de comparar los resultados de laboratorio con una situación de campo, se ejecuta una parcela hidro-erosiva sobre la cual se toman mediciones de lluvia, caudal y pérdida de suelo, para tres eventos distintos sobre la misma área de prueba. Se concluye que el efecto de escala influye en la erodabilidad (K) obtenida en campo y en laboratorio, siendo la magnitud de $K_{laboratorio}$ la multiplicación de un escalar y la K_{campo} .

Finalmente, esta investigación apunta a resaltar el uso de un equipo que se emplea en países latinoamericanos como Brasil, con el objetivo de incentivar su aplicación en Colombia, ya que su simplicidad y bajo costo representa la posibilidad de ser empleado en varias zonas del país que sufren grandes procesos de erosión.

Palabras clave: erodabilidad, Inderbitzen test, parcela hidroerosiva, ceniza volcánica.

Determination of soil erodibility in the east of Antioquia by Inderbitzen Test

Abstract

Currently, erosion processes have increased in the country in response to environmental variations and the antropic intervention, such as the disproportionate increase in urban centers and their consumption needs. This situation generates consequences that not only affect the stability of the land, but also affect areas such as agriculture.

In this context, it is necessary to establish mitigation and remediation measures for land susceptible to erosion. However, currently the methodologies used for the direct measurement of the erodibility of soils in the region are scarce or their implementation is costly. For this reason, it is necessary to implement direct erodibility measurement test that have worked effectively in other countries, such as the Inderbitzen.

The study presented below was developed on a soil with ashes volcanics properties, located in a land without plant cover in Alto de la Virgen, Guarne, Antioquia. The recovered samples were subjected to a serie of laboratory tests, which included physical, chemical, mineralogical, structural and hydro/mechanical characterization tests. Six Inderbitzen tests are also do.

From the tests, it was possible to conclude that soil loss increases as higher flows are applied. Evenly, this loss increases when the slope of the ramp increases. However, the factor that has the greatest influence on the amount of soil loss is the magnitude of the flow. It is also observed that the qualitative classification of soil erodibility obtained through the Inderbitzen test coincides with that indicated by the Universal Soil Loss Equation (USLE)

for which it is considered that the implementation of the equipment leads to satisfactory results with respect to the most widely used methodology at the world. The level of erodibility obtained using correlation with physical, chemical and mineralogical properties is also verified, showing that these expressions require adjustments that allow a closer approach to the results obtained by Inderbitzen test.

In order to compare the laboratory results with a field situation, a hydro-erosive area test is executed on which measurements of rainfall, flow and soil loss are taken, for three different events on the same area. It is concluded that the scale effect influence the erodibility (K) obtained in the field and laboratory, with the magnitud of K_{lab} as the multiplication of a scalar and K_{field} .

Finally, this research evaluates an equipment that is used in Latin American countries such as Brazil, in a soil of Colombia, since its simplicity and low cost represent the possibility of being used in several areas of the country that have many erosion processes.

Keywords: erodibility, Inderbitzen test, hydroerosive area test, ashes volcanics.

Contenido

	Pág.
1. Objetivos.....	5
1.1 Objetivo General	5
1.2 Objetivos específicos	5
2. Antecedentes y revisión de literatura.....	7
2.1 Erosión.....	7
2.1.1 Tipos de erosión	8
2.2 Erosión hídrica en Antioquia.....	10
2.3 Escorrentía.....	14
2.3.1 Concepto de fuerza tractiva	14
2.4 Erodabilidad del suelo	15
2.5 Parcelas hidroerosivas	17
2.6 Ensayo Inderbitzen.....	17
2.7 Estimación de las pérdidas de suelo	35
2.7.1 Factor de erosividad de la lluvia, R	36
2.7.2 Factor de erodabilidad del suelo, K.....	36
2.7.3 Factor topográfico, LS.....	38
2.7.4 Factor de uso del suelo, C	40
2.7.5 Factor de prácticas de conservación, Factor P	41
3. Metodología.....	43
3.1 Área en estudio.....	43
3.1.1 Localización.....	44
3.1.2 Marco geológico regional.....	46
3.1.3 Marco geológico local superficial	48
3.2 Metodología empleada para la recolección de las muestras de suelo	52
3.3 Ensayos de laboratorio.....	55
3.3.1 Caracterización física.....	55
3.3.2 Caracterización mineralógica y estructural.....	58
3.3.3 Caracterización hidro/mecánica.....	59
3.4 Evaluación de la erodabilidad: parcela hidro-erosiva.....	64
3.5 Evaluación de la erodabilidad: ensayo Inderbitzen.....	69
3.5.1 Montaje del equipo Inderbitzen	70
3.5.2 Caja de muestra	72
3.5.3 Preparación de las muestras	73
3.5.4 Ejecución de ensayos: caudal constante, pendiente variable	74
3.5.5 Ejecución de ensayos: pendiente constante, caudal variable.....	75

4. Resultados y análisis de resultados.....	77
4.1 Caracterización física.....	77
4.1.1 Contenido de humedad.....	78
4.1.2 Gravedad específica.....	79
4.1.3 Relación de vacíos.....	79
4.1.4 Límites de consistencia (clasificación según USCS).....	81
4.1.5 Ensayo de granulometría.....	82
4.2 Caracterización mineralógica y estructural.....	86
4.2.1 Difracción de Rayos X.....	86
4.2.2 Potencial de hidrógeno - pH.....	89
4.2.3 Capacidad de intercambio catiónico efectiva.....	90
4.3 Caracterización hidro/mecánica.....	90
4.3.1 Permeabilidad.....	90
4.3.2 Curva característica de succión.....	91
4.3.3 <i>Crumb test</i>	97
4.3.4 Corte directo.....	104
4.4 Evaluación de la erodabilidad.....	105
4.4.1 Parcela hidro-erosiva.....	105
4.4.2 Ensayo Inderbitzen.....	113
4.4.3 Comparación de erodabilidad obtenida en campo y en laboratorio.....	131
4.4.4 Comparación Kusle y K_Inderbitzen.....	141
4.5 Conclusiones.....	142
4.6 Recomendaciones.....	149

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Tipo de erosión identificada en las tierras de Colombia. Reproducción de “Mapa Erosión de las tierras de Colombia Escala 1:8.000.000” por Instituto Geográfico Agustín Codazzi 1996, VI Congreso Colombiano de Geotecnia, Inventario Nacional de la erosión de las tierras colombianas.....	12
Figura 2. Magnitud y severidad de la erosión por departamento. Reproducción de “Estudio Nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia” por Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental - IDEAM, Grupos de Suelos y Tierras, 2015. Cartografía Básica - IGAC, 2012	13
Figura 3. Representación gráfica ecuación Du Boys para la definición de K y Thcrítico a partir de los resultados del ensayo Inderbitzen. Reproducción de “Estudio geotécnico sobre la erodabilidad de suelos residuales no saturados” por Bastos, 1999.....	24
Figura 4. Factor de longitud y grado de pendiente, LS, para usarse con la Ecuación Universal de Pérdida de suelo. Adaptado de “Erosión de suelos”, por M. J. Kirby, 1980, p.56. Copyright 1980 John Wiley & Sons.....	39
Figura 5. Localización del Municipio de Guarne en Colombia (Tomado de Google Earth 25/07/2021)	44
Figura 6. Localización del Municipio de Guarne en Antioquia (Tomado de Google Earth 25/07/2021)	45
Figura 7. Localización del Vereda alto de la virgen en Guarne (Tomado de Google Earth 25/07/2021)	45
Figura 8. Mapa Geológico del Departamento de Antioquia – INGEOMINAS. Tomado de Geología del Departamento de Antioquia Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear (1999).....	47
Figura 9. Perfil de suelo característico en el predio de estudio	50
Figura 10. Mini-parcelas ejecutadas para la extracción de muestras inalteradas.....	53
Figura 11. a y b) Extracción de muestras de suelo Inalteradas en cajas.....	54
Figura 12. Muestras de suelo para ensayo de Papel filtro	61
Figura 13. Conjunto de papeles filtro empleados en cada muestra.....	62
Figura 14. Balanza, precisión 0.0001g	62
Figura 15. Levantamiento de la parcela de campo con cinta métrica y nivel topográfico	64
Figura 16. Topografía de la Ladera - Parcela de Campo	65
Figura 17. Proceso de construcción de la parcela de prueba	66
Figura 18. Parcela de prueba - Medida de la erosión en campo.....	66
Figura 19. Esquemas montaje Equipo Inderbitzen	69

Figura 20. Isométrico Esquemas Equipo Inderbitzen	70
Figura 21. Rampa con orificio cuadrado de lado igual a 20cm	70
Figura 22. Tubo en PVC perforado para la simulación de la escorrentía superficial	71
Figura 23. Anillo para extracción de muestras inalteradas	72
Figura 24. Ensamblaje de la muestra de suelo a la rampa Inderbitzen	73
Figura 25. Recipientes empleados para la recolección del suelo + agua en cada intervalo de tiempo	75
Figura 26. Montaje Ensayo Pendiente constante $S=50^\circ$	76
Figura 27. Carta de plasticidad de Casagrande para el suelo superficial	78
Figura 28. Humedad (w) vs Relación de vacíos (e)	80
Figura 29. Curvas granulométricas con y sin defloculante	82
Figura 30. Difractograma de la muestra de suelo	86
Figura 31. Ceniza volcánica - Estado húmedo	88
Figura 32. Ceniza volcánica - Estado seco	88
Figura 33. Curva característica de retención de agua (Succión total y matricial) en kPa. 92	
Figura 34. Curva característica de retención de agua (Succión total y matricial) en pF... 92	
Figura 35. Curva característica de retención de agua (Succión matricial vs grado de saturación)	93
Figura 36. Pérdida de suelo acumulada en el tiempo para distintas succiones matriciales	95
Figura 37. Proporción de volumen de sólidos erosionado/ Volumen de sólidos total en el tiempo para distintas succiones matriciales	95
Figura 38. Pérdida de suelo acumulada ($g.pF/cm^2$) en el tiempo	97
Figura 39. Erosión y precipitación acumulada	109
Figura 40. Relación entre erosión e intensidad de la lluvia	109
Figura 41. Relación entre el el volumen de escorrentía recolectado en cada evento de lluvia y la erosión del suelo	110
Figura 42. Relación entre la humedad natural del suelo antes de la lluvia y la erosión obtenida	111
Figura 43. Hidrómetros ejecutados sobre suelo erosionado en parcela de campo	112
Figura 44. Resultado pérdida de suelo seco acumulado (gr) x tiempo del ensayo (min). Ensayos de caudal constante, pendiente variable	117
Figura 45. Resultado pérdida suelo seco acumulado (gr) x tiempo ensayo (min). Ensayos de caudal constante, pendiente variable: considerando corrección por material suelto. 118	
Figura 46. Perdida de suelo acumulado en el tiempo Ensayos de caudal constante $Q=65cm^3/s$	119
Figura 47. Perdida de suelo acumulado en el tiempo Ensayos de caudal constante $Q=65cm^3/s$: con corrección por material suelto.	120
Figura 48. Volumen de sólidos erosionado con respecto al volumen de sólidos total en el tiempo Ensayos de caudal constante $Q=65cm^3/s$: con corrección por material suelto.. 120	
Figura 49. Resultado pérdida de suelo seco acumulado (gr) x tiempo del ensayo (min). Ensayos de pendiente constante, caudal variable	125

Figura 50. Resultado pérdida suelo seco acumulado (gr) x tiempo ensayo (min). Ensayos de pendiente constante, caudal variable: considerando corrección por material suelto.	126
Figura 51. Pérdida de suelo acumulado en el tiempo Ensayos de pendiente constante S=50°	127
Figura 52. Perdida de suelo acumulado en el tiempo Ensayos de pendiente constante S=50°: con corrección por material suelto.	128
Figura 53. Volumen de sólidos erosionado con respecto al volumen de sólidos total en el tiempo Ensayos de pendiente constante S=50°: con corrección por material suelto.	128
Figura 54. Peso total acumulado por unidad de área x tiempo para todos los ensayos Inderbitzen ejecutados	130
Figura 55. Peso total acumulado por unidad de área x tiempo para todos los ensayos Inderbitzen ejecutados: con corrección por material suelto.	130
Figura 56. Determinación del factor de erodabilidad K obtenido en campo	132
Figura 57. Regresión hiperbólica para ensayos de caudal constante Q=65cm ³ /s.	134
Figura 58. Determinación del factor de erodabilidad K obtenido en laboratorio – Ensayos Inderbitzen caudal constante, pendiente variable	135
Figura 59. Regresión hiperbólica para ensayos de pendiente constante S=50°	136
Figura 60. Determinación del factor de erodabilidad K obtenido en laboratorio – Ensayos Inderbitzen pendiente constante, caudal variable	137
Figura 61. Pérdida de suelo vs cortante hidráulico, suelo superficial del Oriente Antioqueño	138

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Criterios de erodabilidad adoptados por Santos (2001) para relacionar el índice de plasticidad (IP) y el coeficiente de uniformidad (Cu).....	16
Tabla 2. Coeficientes de rugosidad en función del material según Tomasi (2015)	23
Tabla 3. Criterios de erodabilidad según Bastos (1999)	25
Tabla 4. Criterios de erodabilidad propuestos por Fragassi (2001)	26
Tabla 5. Recopilación desarrollo del estado del arte Equipo Inderbitzen (1)	32
Tabla 6. Recopilación desarrollo del estado del arte Equipo Inderbitzen (2)	33
Tabla 7. Recopilación desarrollo del estado del arte Equipo Inderbitzen (3)	34
Tabla 8. Códigos de estructura del suelo USLE	37
Tabla 9. Códigos USLE de permeabilidad del suelo.....	37
Tabla 10. Factor P de prácticas de conservación.....	41
Tabla 11. Métodos empleados para la determinación de la variable	58
Tabla 12. Resumen propiedades físicas de las muestras de suelo analizadas	77
Tabla 13. Criterios adoptados por Santos (2001) para relacionar el índice de plasticidad (IP) y el coeficiente de uniformidad (Cu)	84
Tabla 14. Porcentaje de dispersión – Criterio Araujo (2000)	84
Tabla 15. Validación de erodabilidad con base en la magnitud de RD (%) – Criterio Bastos (1999)	85
Tabla 16. Tenor de agregación del suelo	85
Tabla 17. Mediciones de pH del suelo	89
Tabla 18. Resultados análisis de intercambio catiónico	90
Tabla 19. Resultados de permeabilidad saturada	90
Tabla 20. Valores típicos del coeficiente de permeabilidad (PINTO,2006)	91
Tabla 21. Ensayos Inderbitzen empleados en el análisis de succión	94
Tabla 22. Crumb test - Datos y resultados	98
Tabla 23. Muestra M1 Crumb test.....	100
Tabla 24. Muestra M2 Crumb test.....	101
Tabla 25. Muestra M3 Crumb test.....	102
Tabla 26. Muestra M4 Crumb test.....	103
Tabla 27. Parámetros de resistencia obtenidos de ensayos de corte directo realizados en muestras bajo condición de humedad natural de campo y muestras saturadas para el suelo superficial en estudio	104
Tabla 28. Magnitud de intensidad y precipitación eventos de lluvia evaluados	105
Tabla 29. Pérdida de suelo obtenida para cada evento de lluvia evaluado	106

Tabla 30. Resumen pérdida de suelo al inicio de los ensayos inderbitzen para Q=65cm ³ /s y pendiente de campo	107
Tabla 31. Tasa de desagregación del suelo para cada evento de lluvia evaluado.....	107
Tabla 32. Índice de erosividad estimado para cada evento de lluvia	108
Tabla 33. Partículas más pequeñas movilizadas en cada lluvia	112
Tabla 34. Humedad inicial muestras ensayos Qcte Svariable	113
Tabla 35. Medidas de caudales volumétricos para cada ensayo Qcte Svariable	113
Tabla 36. Verificación de las condiciones de flujo para los ensayos Qcte Svariable	113
Tabla 37. Ensayo 1 Caudal constante Q=65cm ³ /s S=45°	114
Tabla 38. Ensayo 2 Caudal constante Q=65cm ³ /s S=30°	115
Tabla 39. Ensayo 3 Caudal constante Q=65cm ³ /s S=10°	116
Tabla 40. Humedad inicial muestras ensayos Scte Qvariable	122
Tabla 41. Medidas de caudales volumétricos para cada ensayo Scte Qvariable	122
Tabla 42. Verificación de las condiciones de flujo para los ensayos Scte Qvariable	122
Tabla 43. Ensayo 1 Pendiente constante S=50° Q=65cm ³ /s	123
Tabla 44. Ensayo 2 Pendiente constante S=50° Q=107.5cm ³ /s	123
Tabla 45. Ensayo 3 Pendiente constante S=50° Q=112.5cm ³ /s	124
Tabla 46. Verificación del flujo para cada lluvia en la parcela.....	131
Tabla 47. Estimación del caudal de escorrentía obtenido a partir de cada evento de lluvia	132
Tabla 48. Determinación del cortante hidráulico y pérdida de suelo para cada evento de lluvia – Parcela de Campo.....	132
Tabla 49. Determinación del cortante hidráulico y pérdida de suelo – Ensayos Inderbitzen caudal constante, pendiente variable	135
Tabla 50. Determinación del cortante hidráulico y pérdida de suelo – Ensayos Inderbitzen pendiente constante, caudal variable	136
Tabla 51. Envolvente de ensayos Inderbitzen para la determinación de la erodabilidad.....	138
Tabla 52. Resumen de erodabilidad K obtenida	140
Tabla 53. Clasificación cualitativa erodabilidad según <i>KUSLE</i>	141
Tabla 54. Clasificación cualitativa erodabilidad según <i>KINDERBITZEN</i>	141
Tabla 55. Resumen de clasificación erodabilidad del suelo según diversos criterios	146

Introducción

La erosión es un proceso que implica el desprendimiento, transporte y sedimentación de partículas de suelo o roca. En general, existen dos tipos de erosión: la hídrica y la eólica; siendo la primera la de interés en el presente estudio. La erosión hídrica es causada por la acción del agua (lluvia, ríos y mares). En las zonas de ladera se da de manera más intensa cuando el suelo no tiene cobertura vegetal. En estos casos las gotas de lluvia, ayudadas por la fuerza gravitacional, arrastran las partículas formando surcos o cárcavas, e incluso causando movimientos en masa en los cuales se desplaza un gran volumen de suelo (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS] & Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales [UDCA], 2015).

A nivel nacional, se sabe que el 40% de los suelos del área continental e insular de Colombia correspondiente a 45.379.057 hectáreas, están afectadas por algún grado de erosión, 2.9% presenta erosión severa y muy severa en 3.334.594 ha, 16.8% erosión moderada en 19.222.575 ha, 20% erosión ligera en 22.821.889 ha. Por clase de erosión, el 28.6% del área continental e insular de país se encuentra afectado por erosión laminar asociado a otras clases y predomina en 32.678.635 hectáreas (IDEAM et al, 2015).

En Antioquia, las áreas de suelo que se presentan completamente expuestas debido a la ausencia total de una cubierta vegetal presentan la mayor degradación debido a erosión laminar. Algunos de ellos, tienen que ver con grandes procesos erosivos en los municipios de Toledo, Yarumal, Briceño y Santa Rosa de Osos principalmente (CORANTIOQUIA, 2006).

Por otro lado, en el Valle de Aburrá se han identificado varios fenómenos morfodinámicos importantes, entre los cuales se clasifican principalmente los movimientos en masa, deslizamientos, socavación de orillas, erosión por escorrentía y reptación. En esta región se evidencian fuertes pendientes y escasa capa vegetal, con un deterioro del paisaje (CORANTIOQUIA, 2006).

Lo anterior evidencia la susceptibilidad de los suelos pertenecientes a Antioquia, a sufrir procesos erosivos; lo cual dependerá directamente de las condiciones topográficas y

climáticas de cada área específica. En este escenario complejo, son frecuentes los desastres naturales por procesos erosivos severos, movimientos en masa y flujos, con pérdidas de viviendas, infraestructura, y en muchas ocasiones de vidas humanas (I Simposio Latinoamericano Control de Erosión, 2002).

Es por ello por lo que resulta importante la invención e implementación de métodos para determinar la erodabilidad de los suelos. Existen varias metodologías para su medición indirecta, como la metodología MCT (1979), las ecuaciones de Denardin (1990), Cantalice (2005); o mediante correlaciones de ensayos de laboratorio como la prueba de cono o los ensayos de desintegración. Actualmente la metodología más usada en el medio para la estimación del potencial erosivo es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, 1960), la cual surgió de un análisis empírico a partir de una cantidad de datos tomados de parcelas de erosión en más de 40 localidades de los Estados Unidos de América. (Histórico et al., 2009). Uno de los términos requeridos para estimar el potencial erosivo del suelo mediante esta ecuación es la erodabilidad del suelo, representada con la letra K. La presente investigación busca evaluar la erodabilidad de un suelo perteneciente a la región Antioqueña empleando un equipo de medición directa. Para ello se analizará la erodabilidad de un talud, sin cobertura vegetal, a través del ensayo Inderbitzen, el cual simula las condiciones de lluvia que se dan en campo, permitiendo evaluar la cantidad de suelo erosionado.

El ensayo Inderbitzen permite la medición directa de la erodabilidad de un suelo, sometido a ciertas condiciones de caudal y pendiente. Es una prueba que ha sido muy utilizada en el entorno geotécnico, en especial en Brasil, debido a su practicidad y bajo costo de ensamblaje y ejecución. Esta prueba consiste en la simulación en laboratorio de una muestra de suelo no alterada, sometida a un caudal con el fin de medir la desintegración y transporte de sedimentos debido a la escorrentía superficial. La muestra se dispone sobre una superficie que coincide con un plano de inclinación variable, donde permite evaluar distintas pendientes mientras el flujo de agua es controlado.

La prueba que introdujo este modelo en Brasil se llevó a cabo en taludes a lo largo del BR116 (Rodovia Presidente Dutra) en Río de Janeiro, por Rego (1978); quien validó los resultados obtenidos aplicando medidas indirectas de la erodabilidad, además de compararlos con una parcela hidro-erosiva dispuestas directamente en el sitio de estudio. A partir de dicha comparación, Rego obtuvo resultados satisfactorios lo cual le dio confiabilidad al montaje de Inderbitzen.

A partir de lo anterior se podrán comparar los resultados de erodabilidad de un mismo suelo obtenidos mediante una parcela hidroerosiva y mediante la ejecución del ensayo Inderbitzen. Además, será posible conocer la erodabilidad del suelo, en función de su pendiente y el caudal de escorrentía a la cual se encuentra sometido.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Determinar la erodabilidad de un suelo superficial sin cobertura, perteneciente a la región del Oriente Antioqueño, a través del ensayo Inderbitzen.

1.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de la pendiente del terreno en la erodabilidad del suelo mediante el ensayo Inderbitzen.
- Evaluar el efecto de la intensidad de la lluvia en la erodabilidad del suelo mediante el ensayo Inderbitzen.
- Comparar los resultados obtenidos mediante el ensayo Inderbitzen con una parcela de medición directa en campo.
- Relacionar algunas de las características físicas, químicas, mineralógicas y mecánicas del suelo con su erodabilidad.

2. Antecedentes y revisión de literatura

2.1 Erosión

El proceso erosivo es el fenómeno mediante el cual se genera un desgaste de la roca o el suelo. En este proceso ocurre desagregación, transporte y depositación de partículas por la acción de diferentes agentes erosivos como lo son el agua, el hielo o el viento (Toy et al., 2002).

Camapum de Carvalho et al. (2006) indican que existen factores internos y externos que contribuyen a la intensificación de los procesos erosivos. Dentro de los factores externos indican: potencial de erosión de la lluvia, condiciones de infiltración, escorrentía superficial, pendiente y largo del talud en cuestión. Los factores internos serían: gradiente crítico, susceptibilidad a ser disgregado y erodabilidad del suelo. Estos autores afirman que tanto la erosividad de la lluvia como la erodabilidad del suelo son los factores que más han influenciado los estudios sobre la erosión.

La erosividad se define como la capacidad que tiene la acción de un agente erosivo (las gotas de la lluvia, la escorrentía superficial y otros fluidos) para causar el desprendimiento y transporte de las partículas del suelo. Por otro lado, la erodabilidad es la resistencia del suelo ante un proceso erosivo, la cual depende de las características intrínsecas del suelo y factores secundarios como los ciclos de humedecimiento y secado, además de la composición del agua que cae sobre el suelo (Sales et al., 2017).

La erosividad y la erodabilidad son temas de estudio de diversas áreas del conocimiento como la agronomía, la geología, la hidráulica y la geotecnia (Ribeiro, 2016).

Cunha (1997) hace énfasis en que la erosión en los suelos se considera un proceso natural cuando ocurre en equilibrio con los procesos de formación del suelo y su desgaste natural, modificando de forma lenta y continua el suelo a través de diversos agentes, dándose la erosión eólica, hídrica, marina, glacial, por gravedad y bioerosión (erosión ocasionada por

organismos vivos como: peces, moluscos, crustáceos, etc.). Sin embargo, cuando el proceso erosivo es más intenso, es decir que existe una afectación del suelo más acelerada, se considera como erosión antrópica y en la mayoría de los casos es provocada por la acción humana.

La erosión de origen natural ocurre independientemente de la acción del hombre, esta se da por medio de: acción de la lluvia, tipo de cobertura vegetal, relieve y las características del suelo (Campos, 2014).

La principal causa que desencadena procesos de erosión acelerada o antrópica es retirar la cobertura vegetal del suelo para su posterior uso en actividades agrícolas o de pastoreo (Guerra & Vitte, 2004). Otros factores que contribuyen de manera directa a esta situación son la construcción civil, el crecimiento de las ciudades, la minería, corte de taludes, ocupación desordenada de costas, técnicas agrícolas inadecuadas, entre otras; agravando la problemática de la erosión acelerada y dejando consecuencias que casi siempre son irreversibles.

Es importante mencionar que el proceso erosivo es muy variable en función de las condiciones naturales como el clima, las características del suelo, el patrón de lluvia y la pendiente del terreno (Fu et al., 2019).

2.1.1 Tipos de erosión

2.1.1.1 Erosión eólica

Según Pruski (2009), la erosión eólica consiste en el transporte de partículas debido a la acción del viento, por lo cual es posible observarla con mayor frecuencia en regiones de relieve plano, baja precipitación, alta incidencia de los vientos y poca cobertura vegetal. Este tipo de erosión requiere que la velocidad del viento sea alta y que el suelo tenga una cohesión baja, humedad pequeña y sea altamente propenso a la disgregación.

Este tipo de erosión puede verse reflejada en Colombia mediante evidencias como dunas y formas menores de acumulación por efecto del viento, en algunas zonas de la región del Caribe y de la Orinoquia (Malagon Castro et al., 1996).

2.1.1.2 Erosión marina

Es un tipo de erosión que se da por la acción de sales provenientes de la marea y del aire salado, las cuales al entrar en contacto con la superficie rocosa ingresan a su interior por medio de sus microfracturas y vacíos intergranulares, para luego evaporarse debido a la presencia de viento y sol. Esa evaporación genera una concentración de sales que ocasiona la formación de cristales que generan presiones sobre las paredes de las fracturas y los poros de la roca, causando su fracturamiento y finalmente su ruptura (Stephan, 2010).

2.1.1.3 Erosión hídrica

En el área de geotecnia, la erosión hídrica es la más estudiada ya que ocurre de manera frecuente y causa grandes daños ambientales. La erosión hídrica tiene como agente erosivo la lluvia, generando erosión debido a la acción de la gota de lluvia cuando cae en el suelo y debido a la escorrentía superficial. Ambos aportan al desprendimiento y transporte de las partículas (Bastos, 1999). El primero provoca la disgregación de partículas, especialmente en suelos desprotegidos por vegetación. El segundo se encarga de extraer y transportar las partículas desagregadas (Salomao, 2007).

Factores como el clima, el relieve, el tipo, el uso y la ocupación del suelo por el hombre son determinantes en la susceptibilidad del suelo ante procesos de erosión hídrica. De igual manera, las principales características que condicionan la erodabilidad del suelo son el tipo de suelo, su textura, estructura, permeabilidad, humedad y, en consecuencia, su capacidad de succión (Camapum de Carvalho et al., 2015).

La erosión de los suelos causada por el agua puede clasificarse como laminar, surcos y cárcavas. La erosión laminar sucede mediante desplazamientos cortos de partículas de suelo, en él intervienen dos procesos: a) El desprendimiento de las partículas de suelo y, b) El desplazamiento de dichas partículas. Los surcos por su parte se denominan cuando se forman canales en el suelo debido a la concentración de la escorrentía. Finalmente, las cárcavas son el tipo de erosión más avanzado y se da cuando el agua corre por los mismos surcos el tiempo suficiente para ocasionar entalladuras profundas en el suelo (Malagon Castro et al., 1996).

Según la forma en que ocurre la erosión hídrica es posible clasificarla como erosión interna o superficial. (Camapum de Carvalho et al., 2015) indica que las erosiones internas se dan

principalmente como consecuencia de un gradiente hidráulico grande y un grado alto de dispersión de los suelos. Por otro lado, la erosión superficial ocurre debido a la escorrentía de una precipitación y el impacto directo de las gotas de lluvia en las partículas del suelo. La erosión hídrica superficial comprende tres etapas: desprendimiento de las partículas del suelo debido al impacto de la gota de lluvia, desprendimiento de las partículas del suelo debido a la fricción que se da entre ellas y la escorrentía superficial; y finalmente se da el transporte de dichas partículas mediante la escorrentía superficial.

El poder erosivo de la gota de lluvia está directamente relacionado con la intensidad y duración de la precipitación, el diámetro de la gota, la dirección y velocidad del impacto y la calidad del agua lluvia (Bertoni & Lombardi neto, 2005). Sin embargo, autores como (da Motta, 2001) indican que mediante ensayos de erosionabilidad se evidencia que la pérdida de suelo obtenida sólo bajo efecto de las gotas de lluvia cayendo directamente sobre la muestra es de 5-7 veces menor que la obtenida por escorrentía. Esto sucede debido a que el impacto de la gota de lluvia genera un efecto “splash” que desprende un porcentaje pequeño de partículas permitiendo que el agua entre por los microporos del suelo y se genere a su vez un material disperso el cual aporta a la formación de costras protegiendo el suelo que queda por debajo de ellas. Acto seguido la infiltración del suelo disminuye y comienza un proceso erosivo más agresivo dado por la escorrentía superficial que genera erosión laminar y lineal (Camapum de Carvalho et al., 2015).

La erosión superficial laminar genera un desprendimiento de las partículas de forma relativamente uniforme sobre la superficie del suelo, mientras que la erosión superficial lineal consiste en la generación de surcos debido al flujo concentrado de agua por caminos preferenciales, cuya profundidad máxima es de 10cm.

2.2 Erosión hídrica en Antioquia

Se sabe que, en ambientes de clima tropical, con precipitación anual media a alta los procesos erosivos por acción del agua en movimiento son más intensos. Adicionalmente, si los suelos que se ubican en estos ambientes presentan una variación constante en el grado de saturación y succión, lo que sucede en los suelos de Antioquia, se estaría bajo una condición no saturada, bajo la cual ocurren gran parte de los procesos erosivos (Camapum de Carvalho et al., 2015).

Por otro lado, la erosividad en Colombia en general varía entre alta media y muy alta, sin embargo, la evaluación realizada por el IGAC (1988) sólo asocia algunas áreas de la región Andina y Caribe como de baja a muy baja erosividad.

Según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (1988) la pérdida de suelos en Colombia abarca áreas del orden de 170.000 a 200.000 hectáreas anuales y de los 56 millones de hectáreas afectadas por la erosión el 60% se encuentra en la región Andina (Villada et al., 2002).

Con base en el mapa de erosión de las tierras colombianas realizado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, es posible observar que estas áreas afectadas por la erosión en la región de Antioquia se encuentran primordialmente divididas entre las zonas tipo 2: erosión moderada y tipo 3: erosión ligera (Ver Figura 1).

Mediante la Figura 2 es posible observar que el departamento de Antioquia presenta una magnitud de erosión igual al 60.6% cuya severidad es del 3.2% (IDEAM et al., 2015).

“A nivel de Colombia se sabe que la erosión constituye un problema grave, no sólo en cuanto a la producción de alimentos sino por sus consecuencias en los cursos de agua, embalses, etc. Los factores que más influyen sobre los procesos erosivos del país están asociados con las limitaciones de sus tierras, la erosividad, los conflictos de uso de las tierras, la tenencia de la tierra, el uso actual en desacuerdo con la capacidad del recurso y grandes deficiencias en Reforma Agraria” (Malagon Castro et al;1996).

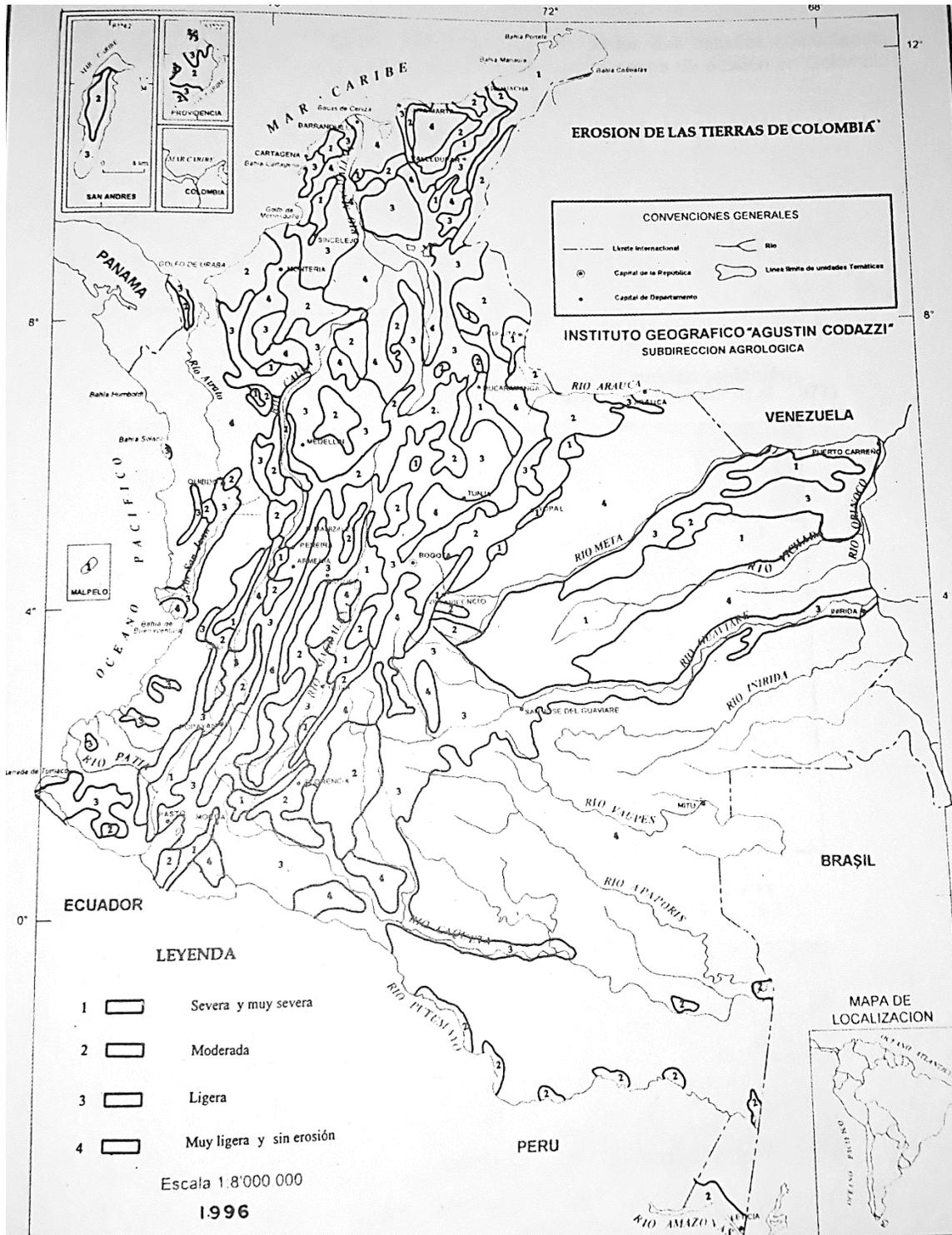


Figura 1. Tipo de erosión identificada en las tierras de Colombia. Reproducción de "Mapa Erosión de las tierras de Colombia Escala 1:8.000.000" por Instituto Geográfico Agustín Codazzi 1996, VI Congreso Colombiano de Geotecnia, Inventario Nacional de la erosión de las tierras colombianas.

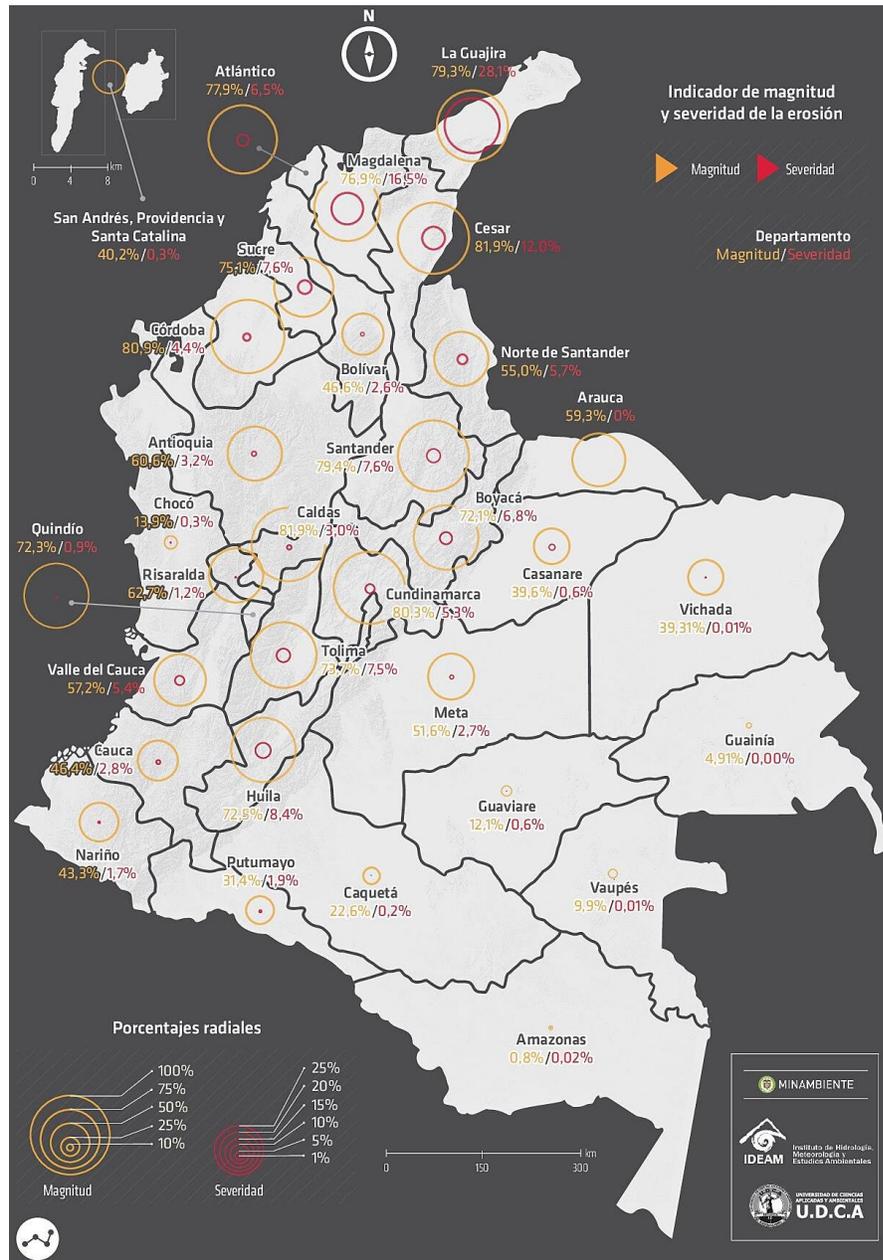


Figura 2. Magnitud y severidad de la erosión por departamento. Reproducción de “Estudio Nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia” por Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental - IDEAM, Grupos de Suelos y Tierras, 2015. Cartografía Básica - IGAC, 2012

2.3 Escorrentía

La erosión hídrica superficial laminar se da a partir de la escorrentía. Esto genera que la remoción de las partículas de suelo ocurra de manera relativamente uniforme. La velocidad de escorrentía está relacionada con la pendiente, la longitud de la pendiente, la rugosidad de la superficie y la relación que exista entre la precipitación y la infiltración. Por su parte la infiltración dependerá de diversos factores como lo son: propiedades del suelo (textura, contenido de materia orgánica, estructura, porosidad, humedad, actividad de la arcilla y la permeabilidad), características de la lluvia, tipo de cobertura vegetal, uso y manejo del suelo, pendiente del terreno y rugosidad (Camapum de Carvalho et al., 2015).

En la escorrentía superficial se genera una fuerza tractiva que moviliza la resistencia al corte de la capa superficial del suelo, generado finalmente el desprendimiento de las partículas.

2.3.1 Concepto de fuerza tractiva

Existen diversas metodologías para calcular la fuerza que el agua o escorrentía en movimiento ejerce sobre las partículas de suelo, una de ellas considera estimar la fuerza tractiva de una corriente, otra mide la capacidad de erosión de la corriente y la otra se basa en la magnitud de la velocidad de la escorrentía.

La fuerza tractiva es la fuerza de corte que ejerce el flujo sobre las partículas del cauce en un determinado punto (Suarez D, 2011).

2.3.1.1 Ecuación general de la fuerza tractiva

Se considera que, para un cauce recto y ancho, la fuerza tractiva ejercida por el agua puede determinarse por medio de la ecuación (2.1).

$$\tau_o = \rho * v^2 = \rho * g * y * i \quad (2.1)$$

Donde:

τ_o = fuerza tractiva (N);

ρ = densidad del agua (kg/m³);

v = velocidad de la corriente en la superficie del cauce (m/s);

y = altura de flujo (m);

i = pendiente promedio (m/m);

g = aceleración de la gravedad (m/s^2).

2.4 Erodabilidad del suelo

La erodabilidad del suelo se define como su falta de resistencia ante procesos erosivos, en consecuencia, de las características propias del suelo. Por esta razón la erodabilidad está directamente relacionada con la resistencia al corte del suelo (Fernandes, 2015).

Según (Camapum de Carvalho et al., 2015) dicha resistencia depende únicamente de la cohesión ya que el aporte del ángulo de fricción está en función de la tensión efectiva, la cual en el caso de la porción más superficial del suelo se considera mínima. Otras de las características que influyen en la erodabilidad del suelo son: textura, estructura, estabilidad de los agregados, contenido de materia orgánica, mineralogía, constitución química, permeabilidad, compactación, pedología y succión.

A nivel general, la susceptibilidad a la erosión hídrica de los suelos aumenta en la siguiente secuencia: grava bien gradada, grava pobremente gradada, arena bien gradada, grava limosa, arcilla de alta plasticidad, arcilla de baja plasticidad, suelo orgánico de baja plasticidad, limo de alta plasticidad, arena arcillosa, arena limosa, limo de baja plasticidad. (Camapum de Carvalho et al., 2015)

Para la evaluación directa de la erodabilidad del suelo se emplean algunos equipos de laboratorio como lo son el ensayo Inderbitzen, *Pinhole test*, *slaking test*, cilindros rotatorios, ensayos de dispersión, entre otros. Para estimar la erodabilidad del suelo de una manera indirecta es posible emplear distintas correlaciones a partir de diferentes parámetros geotécnicos como la granulometría del suelo, sus parámetros de resistencia, coeficiente de permeabilidad, ensayos de caracterización mineralógica y química, entre otros. (Ribeiro, 2016). Sin embargo, Bastos (1999) afirma que no existe una metodología indirecta que sea considerada universal para la determinación de la erodabilidad del suelo. Uno de los parámetros más empleados para correlacionar la erodabilidad del suelo es el tamaño de sus partículas. Vargas (1977) empleó el coeficiente de uniformidad como punto de partida para estimar la erodabilidad del suelo. Este autor indicaba que para el caso de suelos arenosos su erodabilidad será mayor conforme aumente el coeficiente de uniformidad obtenido de su granulometría. Para suelos arcillosos el fenómeno dependerá

también de la estructura del suelo, su contenido de humedad, grado de saturación y expansibilidad.

Bastos (2001) concluye en su estudio realizado en suelos residuales no saturados de la Región Metropolitana de Porto Alegre que, la cantidad de contenido de finos (% pasa la malla #200) es la propiedad que mejor se relaciona estadísticamente con la tasa de erodabilidad (K). El autor afirma que los suelos con una baja erodabilidad presentan contenidos de finos mayores al 55%, mientras que los suelos con erodabilidad media a alta presentan un porcentaje menor al 35%. También indica que los suelos estudiados cuyo $IP \geq 10\%$ presentan una baja erodabilidad, mientras que los suelos con un $IP \leq 5\%$ resultan en una erodabilidad alta.

La Tabla 1 presenta el criterio adoptado por Santos (2001) para la relación entre el índice de plasticidad (IP) y el coeficiente de uniformidad del suelo (Cu) con la erodabilidad.

Tabla 1. Criterios de erodabilidad adoptados por Santos (2001) para relacionar el índice de plasticidad (IP) y el coeficiente de uniformidad (Cu)

IP	Erodabilidad	Cu	Erodabilidad
$IP > 15$	Buena resistencia a la erosión	$Cu > 15$	Baja
$6 \leq IP \leq 15$	Media resistencia a la erosión	$5 \leq Cu \leq 15$	Media
$IP < 6$	Baja resistencia a la erosión	$Cu < 5$	Alta

Nota: Reproducción de "Propuesta metodológica para la validación geotécnica de la erodabilidad de suelos residuales no saturados", por Bastos, 2001, Universidad Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Con respecto a la cohesión del suelo, Bastos (2001) observó que la reducción de la cohesión (Δc) cuando el suelo se encuentra en su estado de humedad natural y bajo condiciones de saturación, presenta una relación estadística significativa con el parámetro K. Los suelos con erodabilidad media a alta presenta un $\Delta c \geq 85\%$, es decir, los suelos más erodables presentan mayor reducción de la cohesión con la saturación en la condición de flujo de agua superficial. Así, la resistencia al desprendimiento y transporte de granos por acción de este flujo está dada por la resistencia al corte entre las capas superficial y subyacente de granos de la superficie del suelo. Esto lleva a entender que el esfuerzo crítico para el corte del suelo puede entenderse como el esfuerzo máximo aplicado al suelo, sin que se desprendan sus partículas (Griebeler, 2002).

2.5 Parcelas hidroerosivas

Con la finalidad de medir la escorrentía y la producción de sedimentos en campo, algunas investigaciones utilizan la parcela hidroerosiva o parcela de erosión como método para su medición. Ésta consiste en la delimitación de un área mediante elementos que permitan mantener sus bordes impermeabilizados, como plástico u hojas de metal, además de servir como canales para que el agua de escorrentía no se salga del área de interés. Al final de la parcela el agua es recolectada mediante una canaleta y finalmente se acumula en un contenedor que permita conocer su volumen. Dicha parcela debe ir acompañada de un elemento tipo pluviómetro o estaciones meteorológicas cercanas que permitan conocer la intensidad de precipitación del evento. Finalmente será posible conocer la cantidad de suelo erosionado en consecuencia de un evento específico de lluvia (Camapum de Carvalho et al., 2015).

Los estudios que emplean parcelas hidroerosivas permiten investigar la capacidad de erodabilidad de un suelo en función de la presencia o no de cobertura vegetal. Además, su realización permite efectuar comparaciones del proceso erosivo con los resultados obtenidos mediante equipos de laboratorio y correlaciones disponibles en la literatura. A nivel regional, algunos trabajos se han desarrollado implementando parcelas hidroerosivas como el desarrollado por (D. Correa & Muñoz, 2000), permitiendo un acercamiento a los procesos erosivos en suelos de la región.

2.6 Ensayo Inderbitzen

Bastos, Milititsky y Gehling (2000) afirman que, entre los ensayos de erosión hídrica, el ensayo Inderbitzen es el más empleado en el medio geotécnico, principalmente por su simplicidad (Almeida, 2014).

El equipo Inderbitzen es uno de los canales hidráulicos más usados en el entorno geotécnico, siendo estudiado y aplicado por varios investigadores entre ellos los que se presentan en este capítulo. Este ensayo se basa en métodos empíricos y aunque a la fecha no se encuentra estandarizado, presenta resultados satisfactorios a la hora de estimar la erodabilidad de los suelos. Adicionalmente, es considerada una prueba simple y de bajo costo a comparación de otros métodos del mismo tipo (Tomasi, 2015).

A pesar de su objetivo inicial específico, el ensayo Inderbitzen se ha utilizado para estudiar varios problemas asociados con el fenómeno de la erosión en el suelo. Su uso frecuente y

diversificado, con los resultados satisfactorios informados, demuestran que esta prueba constituye una herramienta valiosa; además de que emplea materiales y equipos de bajo costo y que son fáciles de reproducir en laboratorio (Chamecki, 2002).

Inderbitzen en 1961 propuso por primera vez el equipo Inderbitzen como un modelo de laboratorio para validar la erodabilidad del suelo. Su objetivo era determinar en el laboratorio la erosión que sufría un terraplén, por una condición determinada de lluvia y la consiguiente escorrentía de agua.

Este equipo está formado por una rampa rectangular donde se ubica un orificio en el cual se fija la muestra inalterada de suelo. Dicha rampa es articulada de manera tal que sea posible simular varias pendientes del terreno en laboratorio. En el modelo propuesto por este autor, la escorrentía superficial era simulada mediante un tubo de cobre perforado, con un largo igual al ancho de la rampa, a través del cual el flujo de agua salía de manera constante (Lemos, 2002). Para garantizar el flujo constante durante todo el ensayo, se empleó un tanque en la parte superior de la rampa (Silveira, 2002). Finalmente, la erosión ocasionada puede evaluarse tomando la cantidad recolectada de las partículas del suelo removido más agua, para cada uno de los tamices ubicados en el extremo inferior de la rampa. Posteriormente este material se somete a un secado en horno y se determina el porcentaje de suelo removido debido a la escorrentía simulada (Chamecki, 2002). En la literatura disponible, no se especifican las condiciones de humedad inicial de las muestras que utilizó Inderbitzen para la ejecución de sus pruebas.

Es importante mencionar que, durante el ensayo, el agua cae desde la parte superior de la rampa hasta pasar por encima de la cara superior de la muestra de suelo. Esto implica que el modelo propuesto originalmente no tenía en cuenta la desagregación del suelo debido al impacto de las gotas de lluvia, más conocido como efecto “splash” (Stephan, 2010). Como resultado, el volumen de suelo erosionado y recolectado en la prueba es menor al que se aprecia en una situación real de campo (Tomasi, 2015). Sin embargo, autores como (da Motta, 2001) indican que la pérdida de suelo obtenida sólo bajo efecto de las gotas de lluvia cayendo directamente sobre la muestra es de 5-7 veces menor que la obtenida por escorrentía, magnitud que no se considera determinante para la clasificación de erodabilidad del suelo.

Los resultados del ensayo se expresan mediante un gráfico de pérdida de suelo por tiempo y velocidad de erosión por tiempo (Ribeiro, 2016). Según Inderbitzen (1991), debido a la

falta de precisión del ensayo, los resultados deben ser considerados cualitativamente (Lemos, 2002).

Según (Lemos, 2002), el trabajo de Inderbitzen permite la variación de una gama de parámetros que se pueden disminuir y/o aumentar en el análisis según las necesidades de cada estudio, tales como: pendiente, caudal, condiciones del suelo (con o sin protección superficial, compactado, húmedo, saturado o parcialmente saturado). Esta posibilidad abrió espacio para que varios investigadores desarrollaran sus propios dispositivos Inderbitzen, cambiando el diseño inicial y analizando parámetros específicos según sus necesidades.

El equipo fue introducido a Brasil entre los años 1975 y 1978 en la investigación "Estabilidad de Taludes" (IPR/COPPE/TRAFECON). Este equipo se construyó de acuerdo con los esquemas realizados por el Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil de Portugal – LNEC, traídos por el Ingeniero Salomeo Pinto (Bastos, 1999).

El equipo planteado por el LNEC fue empleado por (Rego, 1978). Este autor incluyó otros métodos de medición de la erosión superficial con el fin de comparar y validar los resultados obtenidos mediante el equipo Inderbitzen. Además de la ejecución de pruebas indirectas como: ensayos de caracterización, ensayo triaxial modalidad U.U y C.U; y ensayo de corte directo; se incluyó también la instalación de dos áreas de prueba con parcelas hidro-erosivas. Para la ejecución del ensayo Inderbitzen, (Rego, 1978) empleó el mismo diámetro de la muestra del equipo inicial, sin embargo, disminuyó su altura a 4.60cm.

En este caso, el autor hace especial énfasis en las condiciones de humedad de la muestra indicando que este factor influye significativamente en la erodabilidad del suelo, por lo cual realiza el ensayo para muestras bajo condiciones de humedad natural, seca y sumergida. Los resultados del ensayo los presenta mediante curvas de variación: erosión vs tiempo y velocidad de erosión vs tiempo. Dentro de sus conclusiones el autor indica que el 50% de la erosión total de la muestra de suelo ocurre en los primeros 5 minutos del ensayo. Luego entre los 50 y 60 minutos, la erosión de la muestra alcanza el 85% de la erosión total.

En 1981 los investigadores Fonseca y Ferreira presentan su investigación, considerada como uno de los trabajos pioneros en incluir el ensayo Inderbitzen en Brasil (Bastos, 1999). Fonseca y Ferreira (1981) emplearon una rampa cuyo ancho y longitud eran mayores a las dimensiones inicialmente planteadas por Inderbitzen (1961); sin embargo, el diámetro y la altura de la muestra se conserva igual a la propuesta por (Rego, 1978). Estas muestras también son evaluadas bajo condiciones de humedad natural, sumergidas y secas.

Para los resultados del ensayo, Fonseca y Ferreira presentan los mismos gráficos realizados por Inderbitzen y agregan un gráfico donde se aprecia la variación de la velocidad de erosión, calculada para los 5min del ensayo, con respecto al caudal (Lemos, 2002).

Fonseca y Ferreira indican que: el equipo Inderbitzen fue un instrumento útil en la determinación de la erodabilidad de los suelos estudiados, la velocidad de erosión fue inversamente proporcional a la resistencia del suelo y la erodabilidad en suelos húmedos o secos era más sensible que en suelos previamente sumergidos (Lemos, 2002).

En la mesa redonda sobre erosión de carreteras No 2° SNCE, realizada en 1981, el profesor Job Nogami señaló otras de las limitantes que conlleva la ejecución del ensayo Inderbitzen. Este investigador indicó que el equipo no tiene en cuenta la infiltración del agua a través del cuerpo de prueba, factor relevante en el estudio de la erosión en climas tropicales. Apunta que para el caso de suelos con buena infiltración y por ende menor probabilidad de generar escorrentía, el ensayo tendería a mostrar una erodabilidad mayor que la real. Otra de las limitantes que menciona es la alteración del flujo laminar que puede presentarse debido a la discontinuidad entre la rampa y los bordes de la muestra. En la misma discusión se sugirió la implementación de un simulador de lluvia en la prueba, con el objetivo de reproducir el efecto desintegrador determinado por las gotas de lluvia cuando caen directamente sobre el suelo (Bastos, 1999).

Más tarde, en el año de 1991, Facio realizaría su investigación empleando el equipo Inderbitzen, conservando el ancho propuesto por el autor inicial y aumentando la longitud de la rampa. El diámetro de la muestra fue disminuido, pero se conservó su altura original. (Chamecki, 2002) afirma que estas modificaciones del equipo simplifican el ensayo, pero pueden causar pérdida de precisión. Lo anterior se confirma en el estudio de (Inderbitzen, 1961) donde indica que entre mayor sea el área expuesta del suelo, mayor será la precisión de los resultados de la prueba. Otra diferencia importante en el equipo de este autor es que su versión contenía tres rampas que funcionaban de manera paralela, con la intención de evaluar la erodabilidad de distintas muestras de suelo simultáneamente (Silva & Melo, n.d.).

Facio indicaba que para estandarizar el ensayo Inderbitzen, se debían fijar algunos parámetros, cuyas magnitudes ideales según su investigación eran: emplear un caudal de 50ml/s, una duración del ensayo de 20 minutos, una pendiente de 10° y utilizar una fijación roscada de la muestra en vez de encajarla en la rampa (Silva & Melo, n.d.).

Por otro lado, el mismo autor propuso que los resultados del ensayo se presentaran en forma gráfica como la pérdida de suelo acumulada en g/cm^2 en función del tiempo en minutos. A partir de la realización de ensayos, el autor concluyó que la pérdida de suelo aumentaba cuando: el grado de saturación disminuía, el caudal aumentaba o cuando la pendiente de la rampa aumentaba. También indica que la pérdida de suelo más significativa durante el proceso de erosión (un 65% de la masa de suelo total), sucede durante los primeros cinco minutos del ensayo (Silva & Melo, n.d.).

El equipo Inderbitzen empleado por (Santos, 1997) seguía las indicaciones geométricas del equipo propuesto por (Fácio, 1991); sin embargo, Santos adicionó a la estructura un canal estrecho que recorre toda la longitud de la rampa de tal manera que el caudal circule únicamente por esta zona. El ancho de dicho canal corresponde al diámetro de la muestra, por lo cual la totalidad de la lámina de agua pasa exactamente sobre la muestra de suelo. Debido a esta reducción, el caudal empleado fue menor, siendo de 17.5ml/s. Con estos cambios, la duración de la prueba paso de 20min a 30min. Santos (1997) explica que en esta prueba no se tuvo en cuenta los efectos erosivos provocados por las gotas de lluvia ya que en estos lugares el flujo superficial actúa de manera más marcada ocasionando el mayor porcentaje de erosión. Según Santos (1997), la saturación de la muestra es importante para generar la menor influencia de la succión durante el ensayo (Gomes de Aguiar, 2009). Abdelmajid & Lima (1999) indicaron a partir de sus estudios que: *“a mayor contenido de humedad tenga el suelo, la muestra absorbe menos agua. Por lo tanto, el proceso de saturación del suelo permite una mayor escorrentía lo que conduce a una mayor fuerza de corte del agua sobre la superficie del suelo y por lo tanto permite una mayor interacción de la fuerza erosiva del agua con la resistencia a la erodabilidad de la muestra.”*

Posterior a los estudios realizados por Facio (1991) y Santos (1997) se hace evidente la necesidad de modificar las dimensiones originales del equipo Inderbitzen. Dentro de las nuevas adaptaciones está la reducción del ancho del canal a 10cm para garantizar que toda la cantidad de agua pase sobre la muestra de suelo. En consecuencia, se deberá reducir también el caudal de 50ml/s a 17.5ml/s, conservando así la proporcionalidad del flujo de agua en la rampa con ancho reducido. El tiempo de duración de la prueba también aumentaría a 30min con el objetivo de caracterizar mejor la curva de pérdida de suelo vs tiempo (Gomes de Aguiar, 2009).

Bastos (1999) realizó un estudio de la erodabilidad de los suelos localizados en la Región Metropolitana de Porto Alegre (RMPA), ya que estos suelos históricamente han presentado

condiciones de erosión hídrica graves. Este autor no conservó las consideraciones geométricas realizadas en años anteriores por autores como Fragassi y Santos, quienes intentaron estandarizar el equipo. Bastos (1999) construyó una rampa con un ancho y una longitud menor en comparación a los modelos mencionados con anterioridad. Sin embargo, las dimensiones de la muestra permanecieron muy similares. Bastos (1999) emplea caudales entre 50ml/s y 100ml/s generando flujo laminar. En este caso, el autor evalúa la erodabilidad del suelo bajo distintas condiciones de humedad, como lo son: humedad natural, seca al aire (mínimo durante 17 horas) y saturada por ascenso capilar (mínimo durante 24 horas).

Los resultados de la investigación de Bastos (1999) fueron graficados como la variación del peso acumulado de suelo seco erosionado por unidad de área de la muestra (gr/cm^2) vs la tensión de corte hidráulica. Por otro lado, Graf (1984, citado por Bastos, 1999), considerando la teoría de hidráulica de canales, indica que la erosión del suelo se da cuando la tensión de corte hidráulica del fluido supera la tensión de corte del suelo. Esta última puede ser calculada mediante la ecuación (2.2), de Du Boys, desarrollada en 1876, la cual considera que los sedimentos se mueven en capas, cada una con cierto espesor, debido al esfuerzo cortante hidráulico del fluido en cada una de ellas.

$$\tau_h = 10000 * \gamma * h * \tan \alpha \quad (2.2)$$

Donde:

τ_h = tensión de corte hidráulica (Pa);

γ = peso específico del agua ($0.01 \text{ N}/\text{cm}^3$);

h = altura de lámina de flujo (cm);

α = ángulo de inclinación de la escorrentía (grados).

La altura de la lámina obtenida a través del caudal, la velocidad del flujo y el ancho de la rampa hidráulica se calcula conforme a la ecuación (2.3).

$$h = \frac{Q}{v * L} \quad (2.3)$$

Donde:

h = altura de la lámina de flujo (cm);

v = velocidad del flujo (cm/s);

Q = caudal (cm³/s);

L = ancho de la rampa hidráulica (cm).

La velocidad de flujo se obtiene con la ecuación (2.4), siendo la fórmula de Chezy con el coeficiente de Manning:

$$v = R_h^{\frac{2}{3}} * I^{\frac{1}{2}} * \frac{1}{\eta} \quad (2.4)$$

R_h = radio hidráulico (cm). $R_h = \text{Área_mojada} / \text{Perímetro_mojado}$;

I = pendiente (cm/cm);

η = coeficiente de rugosidad (adimensional) – en función del material, ver Tabla 2.

Tabla 2. Coeficientes de rugosidad en función del material según Tomasi (2015)

Material	Coeficiente (η)
Plástico, fibrocemento, aluminio, acero inoxidable, acero galvanizado, cobre, lata	0.011
Hierro fundido, concreto alisado, mampostería revestida	0.012
Cerámica y concreto no alisado	0.013
Mampostería de ladrillo sin revestimiento	0.015

Nota: Reproducción de “Ensayo Inderbitzen para la validación de la erodabilidad de suelos y rocas: aplicación en las regiones de Santa María, San Francisco de Asis y Porto Alegre/RS” por Tomasi, 2015, trabajo de grado Ingeniería Civil, Universidad Federal de Santa María.

La gráfica presentada por Bastos (1999) puede ajustarse como una recta, con la cual es posible estimar los parámetros de erodabilidad: tensión de corte crítica del suelo ($\tau_{critico}$), que corresponde al valor máximo de τ_c donde la erosión es nula, y la tasa de erodabilidad K , representado como el gradiente de pérdida de suelo en relación con las tensiones hidráulicas aplicadas (ver Figura 3). En su investigación, Bastos (1999) afirma que la relación entre la pérdida de suelo y la tensión hidráulica de corte será siempre lineal. Sin embargo, esta hipótesis de linealidad se plantea para el rango de tensiones aplicadas para el ensayo que según el autor son las que se emplean en los experimentos de erosión del suelo.

“La proporcionalidad entre τ_h y la pérdida de suelo (denominada como D_c) ha sido demostrada por numerosos autores como Partheniades (1965), Foster (1982), Nearing et al (1990), Zhang et al (1996), Bastos (1999), Dey (2014) y Kimiaghali et al (2016).

Aunque en la literatura se indica que la relación deja de ser lineal a partir de cierta magnitud de cortante hidráulico, autores como Lane, Foster y Nicks (1987) afirman que asumir una relación lineal es aceptable para cuantificar de manera aproximada la pérdida de suelo” (de Oliveira et al., 2021).

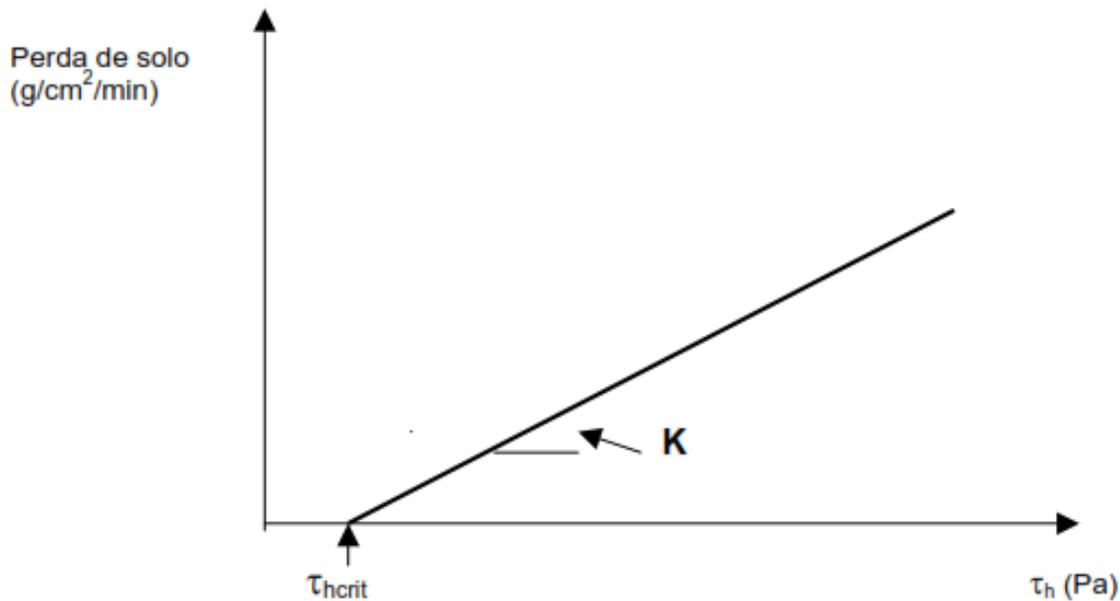


Figura 3. Representación gráfica ecuación Du Boys para la definición de K y Th crítico a partir de los resultados del ensayo Inderbitzen. Reproducción de “Estudio geotécnico sobre la erodabilidad de suelos residuales no saturados” por Bastos, 1999.

$$Dc = Kr(\tau_h - \tau_c) \quad (2.5)$$

Donde:

Dc: tasa de desagregación del suelo (gr/cm²/min);

Kr: coeficiente de erosión del suelo (gr/cm²/min/Pa);

τ_h : tensión cortante del flujo (Pa);

τ_c : tensión cortante crítica del suelo (Pa).

Sin embargo, varios autores que han realizado pruebas utilizando equipos similares al Inderbitzen (canales), indican que la tasa de erosión (Dc) puede variar durante la prueba,

generándose curvas de erosión con un comportamiento hiperbólico. Por esta razón se recomienda realizar regresiones del tipo hiperbólico para conocer la pérdida de suelo esperada después de cierto tiempo transcurrido durante el ensayo (de Oliveira et al., 2021). En consecuencia, Bastos (1999) sugiere que el valor de K sea calculado empleando la secante a la curva de pérdida de suelo.

Conociendo los valores de erodabilidad K proporcionados por la gráfica mencionada, es posible determinar el nivel de erodabilidad del suelo con base en la Tabla 3.

Tabla 3. Criterios de erodabilidad según Bastos (1999)

Valores de K	Nivel de erodabilidad
$K < 0.001 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$	Baja erodabilidad
$0.001 < K < 0.1 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$	Mediana erodabilidad
$K > 0.1 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$	Alta erodabilidad

Nota: Reproducción de "Estudio geotécnico sobre la erodabilidad de suelos residuales no saturados" por Bastos, 1999.

Bastos (1999) advierte que las simplificaciones en la estimación de esfuerzos hidráulicos a través de cálculos causan mayor dispersión de los resultados para este parámetro. Es por ello, según el autor, que en varios casos la intersección de la línea ajustada con el eje x podría indicar una tensión negativa y, en consecuencia, se considera indeterminado. Físicamente este valor negativo estaría indicando que el suelo comenzó a erosionarse antes de que se le aplicara una tensión de corte hidráulica.

Bastos (1999) también realizó estudios que relacionan la erodabilidad de los suelos con la colapsibilidad y la variación de la resistencia al corte con el humedecimiento de los suelos. En cuanto a la colapsibilidad, el autor indica que esta propiedad no presentó una relación satisfactoria con la erodabilidad mediante el ensayo Inderbitzen. Por otro lado, afirma que en su estudio que relacionaba la resistencia al corte del suelo, representada por la cohesión, se observó que los suelos más erodables son aquellos que presentan mayor pérdida de cohesión con humedecimiento o saturación, por lo tanto, son más vulnerables al desprendimiento de las partículas cuando se aplica un cortante hidráulico.

Bastos (1999), citando a Nogami (1981), señala como limitante del ensayo Inderbitzen que no tiene en cuenta su capacidad de infiltración. Esto hace que suelos con alta infiltración, puedan resultar en una erosión más acentuada en el laboratorio que la real en campo. Otra limitación que menciona es la perturbación del flujo, generada por la discontinuidad entre

la rampa y los bodes de la muestra. Ambas limitaciones pretenden ser resueltas más adelante en el modelo propuesto por Freire (2001).

Fragassi (2001) estudió el grado de erodabilidad de los suelos de la Sierra de Sao Geraldo en taludes de la formación gneis situados dentro de la Universidad Federal de Vicosa, ciudad de Vicosa-MG. El modelo Inderbitzen que propuso constituye la base más pequeña de los prototipos presentados hasta el 2001, ya que a diferencia de Santos (1997), el aparato no tiene un canal interno, sino que el ancho del canal ya coincide con la muestra, garantizando así que todo el flujo pase por encima del suelo. La muestra conserva medidas similares a los equipos propuestos por Rego (1978), Fonseca y Ferreira (1981). Al igual que otros autores, Fragassi (2001) prefiere llevar las muestras a condiciones saturadas con el fin de uniformizar las condiciones de humedad. Otro cambio que realizaron fue el material de la rampa, pasando de metal a PVC, indicando que este segundo permite la obtención de una superficie lisa y nivelada de manera más fácil que cuando se construye con metal, mejorando así las condiciones de flujo laminar sobre la rampa.

En el caso de la investigación de (Fragassi & Marques, 2001) el material que pasó la malla #200 era representativo, por lo cual graficó los resultados como la pérdida de suelo ponderado por la fracción mayor a 0.074mm, a partir de las curvas granulométricas. Al igual que los investigadores anteriores, se presenta la pérdida de suelo seco acumulado por unidad de área de la muestra (g/cm^2) en función del tiempo (min).

Los autores Fragassi y Marques (2001) también expusieron sus propios criterios de erodabilidad, haciendo uso de la propuesta planteada anteriormente por DNER (1979) para caudales iguales a 25ml/s.

Tabla 4. Criterios de erodabilidad propuestos por Fragassi (2001)

Velocidad de erosión	Clasificación
0.0 a 0.8 $\text{g}/\text{cm}^2/\text{h}$	Resistente a la erosión
0.8 a 25.0 $\text{g}/\text{cm}^2/\text{h}$	Comportamiento regular a malo frente a la erosión
Mayor a 25.0 $\text{g}/\text{cm}^2/\text{h}$	Mal comportamiento frente a la erosión

Nota: Reproducción de "Desarrollo de una nueva versión del Equipo Inderbitzen" por Fragassi, 2001, Simposio Nacional de control de erosión, Brasil.

Santos et al (2002) implementó el equipo Inderbitzen para su investigación en la región de Santo Antonio do Leite, distrito de Our Preto – Minas Gerais. Las condiciones del equipo empleadas son las indicadas por Fragassi y Marques (2001). Durante la ejecución del

ensayo este autor no dejó constante el caudal durante toda la prueba, sino que lo fue aumentando gradualmente. El caudal inicial era de 25ml/s, el cual permanecía constante durante los primeros 25min de la prueba. Luego este caudal fue aumentando cada cinco minutos de la siguiente manera: 50ml/s, 100ml/s y 150ml/s. A raíz de esto se pudo observar que la erodabilidad del material aumenta a medida que el caudal se elevaba (Stephan, 2010).

Los resultados de sus ensayos fueron representados en graficas de tiempo del ensayo (min) vs pérdida de suelo acumulada por unidad de área de la muestra (g/cm^2); tiempo del ensayo (min) vs velocidad de erosión en función del tiempo ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{h}$) y caudal (l/min) vs erodabilidad (g/cm^2). De esta manera pudo concluir que con el paso del tiempo la velocidad de erosión se estabiliza, premisa que ya ha sido afirmada por otros autores anteriores a él. Los ensayos realizados por los autores Tatto (2007), Fernandes (2011), Sant'Ana (2012), Basso (2013) y Pittelkow (2013) se basaron en el trabajo de Bastos (1999). Los ensayos fueron realizados también bajo tres condiciones de humedad: humedad natural, seco y pre-humedecido (Fernandes, 2015).

Ese mismo año, (da Motta, 2001) fue de los primeros autores en instalar un simulador de lluvia sobre la muestra dispuesta en la rampa del Inderbitzen, con la finalidad de incluir el efecto "splash" (desagregación de la muestra por el impacto del agua) en el procedimiento. Esta ducha se posicionó a una altura de 38cm de la muestra y la intensidad de la lluvia simulada fue controlada a través de medidas de volúmenes por unidad de tiempo, antes de iniciar los ensayos. Inicialmente realizó el ensayo generando la erosión del suelo sólo por la acción de la precipitación simulada con la ducha, a partir de lo cual pudo observar que, durante veinte minutos, la muestra perdió de cuatro a siete veces menos cantidad que la observada en el ensayo Inderbitzen tradicional. Por lo cual se entiende que, aunque las gotas de lluvia si influyen en el proceso, ya que impactan inicialmente la partícula de suelo debilitándola, la mayor parte de erosión se obtiene debido a la escorrentía.

Freire (2001) propuso un nuevo experimento que modificaba toda la estructura del ensayo, aunque conservaba objetivos similares al Inderbitzen original. A esta nueva versión, el autor la denominó "Ensayo Inderbitzen Modificado". Con este modelo el autor soluciona algunos problemas que se habían detectado a lo largo del tiempo con los demás prototipos, como la mencionada por Bastos (1999), donde el ensayo no tenía en cuenta la infiltración del agua lo que podría resultar en una erosión más acentuada en laboratorio que en campo. Otro de los inconvenientes que soluciona es que evita la perturbación del flujo que se podía presentar anteriormente debido a un pequeño espesor de los bordes de la

muestra que podría sobresalir sobre la rampa, generando una perturbación en el flujo que debía conservarse como laminar.

Para este caso, en vez de la rampa metálica se emplea una estructura de rejilla inclinada, sobre la cual se dispone la muestra prismática sin confinamiento. Sobre la muestra se sitúan dos tubos perforados que crean dos líneas de precipitación de agua que cae directamente sobre la muestra generando erosión por el impacto de las gotas. El material que se erosiona a través del flujo vertical es recolectado en un conjunto de tamices en períodos determinados previamente, como se ha realizado para todas las versiones del Inderbitzen. A partir de esto es posible obtener el peso seco del suelo erosionado, el cual se relaciona con el área de la superficie de la muestra para conocer la erodabilidad del suelo (Ver Ecuación (2.6)). Esta última también puede ser calculada como el porcentaje de pérdida en relación con el peso inicial de la muestra (Freire, 2001).

$$E = \frac{Ps}{A} \quad (2.6)$$

Donde:

E= erosión (g/cm²);

Ps= peso del suelo seco (g);

A= área superficial de la muestra (cm²).

Finalmente, por medio de la medida de erosión, es posible evaluar la susceptibilidad erosiva.

Sin embargo, Freire (2001) ha indicado que aún está planteando algunas modificaciones al ensayo debido a que la simulación de la lluvia mediante los dos tubos perforados planteados, no se asemejan a la dinámica natural del fenómeno en campo. Dichas tuberías de PVC afectan el suelo de forma concentrada y continua, diferente a la lluvia natural. Este autor también hace hincapié en que, a pesar de los resultados cuantitativos obtenidos en el ensayo, la prueba es predominantemente cualitativa y comparativa.

A partir de los modelos del ensayo en los cuales se involucró el efecto de las gotas de agua, otros investigadores han realizado trabajos en los que se incluyen simuladores de lluvia. Lemos (2002) empleó un simulador de lluvia con el cual buscaba asociar la acción del impacto de las gotas con la de la escorrentía en la prueba Inderbitzen. Este simulador consistía en una malla de 10cm x 10cm, alcanzando un área de cobertura de 4m², ubicada

a una altura de 1.50m de la rampa Inderbitzen. Su configuración permite que las gotas de agua caigan a una distancia de 20cm entre sí, y generan gotas de diámetro igual a ½ pulgada. Las dimensiones de la rampa que empleó eran similares a las propuestas por Fonseca y Ferreira (1981) pero el tamaño de la muestra, la inclinación y el tiempo del ensayo fue definido según la estandarización sugerida por Facio (1991).

Lemos (2002) empleó también caudales variables entre las pruebas, con valores que iban desde 54ml/s a 152ml/s. Los resultados de su investigación fueron presentados en gráficos de velocidad de erosión ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{h}$) vs tiempo (min) y pérdida de suelo (g/cm^2) vs tiempo (min). El autor indica que se presenta uniformidad en las curvas obtenidas de los ensayos ejecutados solo bajo escorrentía superficial generada mediante el reservorio. Para las pruebas realizadas con el simulador de lluvia las curvas no presentan uniformidad.

(Mendes, 2006) realizó una serie de ensayos Inderbitzen con el objetivo de verificar el potencial erosivo de los suelos estudiados previamente mediante parcelas experimentales. Su estudio se realizó en las laderas de la zona rural del municipio de Bom Jardim – RJ. El autor extrajo muestras de tres parcelas diferentes y los sometió a un proceso de erosión mediante un caudal suministrado por un tanque, desde la parte superior de la rampa. Empleó un ancho de la rampa más grande en comparación con los autores expuestos hasta ahora en este capítulo. La longitud de la rampa era de 1m y la muestra tenía un diámetro de 15cm y una altura de 4cm. En este ensayo, la inclinación de la rampa coincidía con la pendiente del talud en cuestión, la duración e intensidad de la escorrentía superficial simula la intensidad y tiempo y concentración de las lluvias de la región. El autor resalta que el comportamiento de la erosión del suelo ubicado en el equipo Inderbitzen presenta una dinámica similar al encontrado en la parcela experimental.

Los resultados de la investigación de Mendes (2006) fueron presentados en gráficos que relacionaban el peso seco acumulado del suelo erosionado (g) y el tiempo (min).

Higashi (2006) empleó el modelo propuesto por Freire (2001), reemplazando el simulador tubular de lluvia propuesto por este autor, por una ducha posicionada directamente sobre el suelo con dimensiones similares a la muestra. El autor indica que la escorrentía fue generada con un caudal mínimo que permitiera la escorrentía laminar superficial sobre la muestra.

Según Higashi (2006) la erodabilidad del suelo se expresa en porcentaje y se calcula como la razón entre el peso del material retenido en cada tamiz después de ser sometido a secado y el peso total seco de la muestra.

$$e = \frac{Prss}{Ptss} * 100 \quad (2.7)$$

Donde:

e= erodabilidad del suelo (%);

Prss= peso del suelo seco retenido en los tamices del ensayo (gr);

Ptss= peso total del suelo seco (gr).

Stephan (2010) realizó un análisis de erodabilidad en tres taludes de Juiz de Fora, utilizando como medida directa el ensayo Inderbitzen. La autora utilizó dos rampas con diferentes orificios, uno circular y el otro cuadrado, para la disposición de la muestra con el objetivo de verificar la influencia de la forma de la muestra en los resultados de erodabilidad. Para ello estableció un valor único para la pendiente y el caudal. Los resultados obtenidos indicaron que la forma de la muestra influye de manera determinante en la erodabilidad del suelo.

A pesar de todos estos cambios metodológicos y físicos en el equipo propuesto por Facio (1991) y posteriormente empleado de manera similar por, Santos (1997), Bastos, Milititsky y Gehling (1999) y Fragasse y Marques (2001), en todas las metodologías se emplean especímenes con una forma circular. Este diseño de muestra implica que el flujo de agua que alcanza los bordes de la muestra sea menor a la cantidad de agua recibida por la zona central. Como resultado, la erodabilidad se produce de manera más intensa en el centro de la muestra de suelo (Gomes de Aguiar, 2009). Para evitar esto, autores como Gomes de Aguiar (2009), proponen implementar una muestra de suelo rectangular.

A nivel general, los autores citados indican que la mayor pérdida de suelo por erosión superficial se da en los primeros cinco minutos del ensayo. Luego la curva continúa con una inclinación menor hasta lograr estabilizarse en aproximadamente 20min, en ese momento la curva se aproxima a una línea recta horizontal (Gomes de Aguiar, 2009). Autores como Fonseca y Ferreira (1981), Facio (1991), Santos (1997), Lemos (2002), Mendes (2006) y Menezes et al. (2006) confirman este hecho.

Las observaciones de varios investigadores con respecto al equipo Inderbitzen es que representa una buena herramienta para los estudios de erosión en laboratorio (Brasil, 1979; Ferreira y Fonseca, 1991; Bastos, 1999; Lemos, 2002). Entre sus ventajas mencionan que permite obtener una clasificación cualitativa del suelo en estudio, comparar

varios suelos entre sí, el mismo suelo bajo distintas condiciones de humedad y permite simular los procesos naturales a los cuales se encuentra expuesto el suelo (Chamecki, 2002).

Tabla 5. Recopilación desarrollo del estado del arte Equipo Inderbitzen (1)

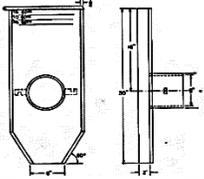
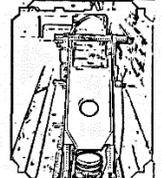
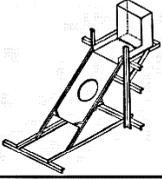
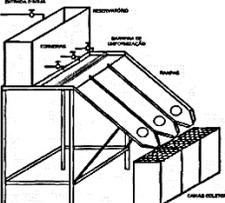
Investigación	Autor (es)	Año	Esquema del equipo	Ancho rampa (cm)	Longitud rampa (cm)	Diámetro de la muestra (cm)	Altura de la muestra (cm)	Confinamiento de la muestra	Caudal de ensayo (cm ³ /s - m ³ /s)	Inclinaciones de rampa	Condiciones de humedad de la muestra	Tiempo del ensayo (min)
An erosion test for soils.	Inderbitzen	1961		30.48	78.20	15.24	15.2	Si	-	-	-	120
La investigación se ejecutó en taludes de la Rodovia Presidente Dutra - BR 116 en Rio de Janeiro	Rego	1978		40	70	15.24	4.60	Si	179-314	44° - 59°	humedad natural seco en estufa a 50° sumergido	120 minutos. Toma de datos en 5, 15, 30, 60, 120
Estabilidad de Taludes LNEC, IPR/COPPE/TRAFAECON Rodovia Rio-Sao Paulo	Fonseca y Ferreira	1981		34	78	15.24	4.60	Si	59 - 314	44° - 59°	humedad natural seco saturado	120 minutos. Toma de datos en 5, 15, 30, 60, 120
Propuesta de una metodología de estudio de erodabilidad de suelos del Distrito Federal, UnB, Brasília, DF	Facio	1991		33	130	10	4.60	Si	50	10°	humedecimiento previo para uniformizar las condiciones de saturación de las muestras. Durante un tiempo de 15min	20
Procesos erosivos en Goiania	Santos	1997		33 Canal ancho de 10cm	130	10	4.60	Si	17.5	10°	Saturado	30

Tabla 6. Recopilación desarrollo del estado del arte Equipo Inderbitzen (2)

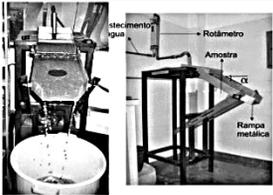
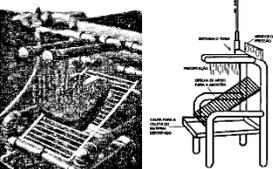
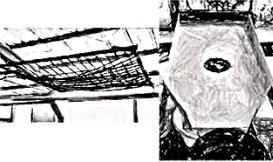
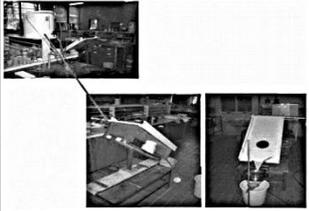
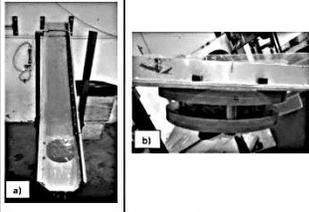
Investigación	Autor (es)	Año	Esquema del equipo	Ancho rampa (cm)	Longitud rampa (cm)	Diámetro de la muestra (cm)	Altura de la muestra (cm)	Confinamiento de la muestra	Caudal de ensayo (cm ³ /s - ml/s)	Inclinaciones de rampa	Condiciones de humedad de la muestra	Tiempo del ensayo (min)
Región Metropolitana de Porto Alegre (RMFA) - Rio Grande do Sul. Construido en LMS/UFRGS	Bastos	1999		25	60	9,76 - hueco 10cm	5	Si	50 - 100 3L/min - 6L/min	10° - 26° - 45° - 54°	humedad natural seco (72h al aire) prehumedecido (24h piedra porosa apoyada en agua:capilaridad)	20min Lecturas a las 1min, 5min, 10min, 15min y 20min.
Suelos residuales de gneis de la Serra de São Geraldo y una pendiente de suelo gneisico ubicado en Viçosa (MG)	Fragassi y Marques	2001		22	120	15.2	4	Si	25	10°	Muestras próximas a la saturación, las dejan saturando 15min (Con la intención de uniformizar las condiciones de humedad)	30min en total. Mediciones en 5, 10, 15 y 30min
Campo Grande	Da Motta	2001		10	-	10	-	Si	25 - 75 1,5L/min - 4,5L/min	5° - 40°	-	30
Alfenas e Poços de Caldas. Muestras de suelo residual y lateríticos	Freire	2001		-	-	10cm de lado	4.6	No	-	0° - 35°	Humedad Natural	Suelo saprolítico sometido durante 600min Suelo laterítico sometido durante 90min.
Validación de la erosión superficial en áreas para uso agrícola sometido a dos formas de plantación, directa y convencional.	Lemos	2002		34	78	10	4.60	Si	54 - 152	10-46	Humedad Natural Seco al aire por 24h	20

Tabla 7. Recopilación desarrollo del estado del arte Equipo Inderbitzen (3)

Investigación	Autor (es)	Año	Esquema del equipo	Ancho rampa (cm)	Longitud rampa (cm)	Diámetro de la muestra (cm)	Altura de la muestra (cm)	Confinamiento de la muestra	Caudal de ensayo (cm ³ /s - ml/s)	Inclinaciones de rampa	Condiciones de humedad de la muestra	Tiempo del ensayo (min)
Análisis de procesos erosivos superficiales por medio del Ensayo de Inderbitzen	Higashi	2006		-	-	-	-	No	2.78	-	Humedad Natural Seco al aire por 72h	120
Laderas de una zona rural del municipio de Bom Jardim - RJ	Mendes	2006		50	100	15	10	Si	50	37°	Humedad Natural	60min en total. Mediciones en 5, 10, 15, 30, 45 y 60
Análisis de procesos erosivos superficiales por medio del Ensayo de Inderbitzen	Stephan	2010		Orificio circular= 14,4cm Orificio cuadrado 10cm= 14,2cm Orificio cuadrado 15cm= 9,3cm	170	Orificio circular= 15cm de diámetro. Orificio cuadrado= 10cm y 15cm de lado.	3	Si	16.7	10°	Humedad Natural	30min en total. Mediciones en 1, 3, 5, 9, 15 y 30min
Análisis de procesos erosivos superficiales en el área de Minas Alegria Norte y Sur	Ribeiro	2016		22	170	14.4	4.3	Si	16,7 - 116,7	30°	Humedad Natural	Lecturas en 1min, 5min, 10min y 15min.

2.7 Estimación de las pérdidas de suelo

Existen varios métodos y procedimientos para estimar las pérdidas de suelo relacionadas con actividades humanas, es decir, erosión acelerada, pero la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo, USLE, es una de las de mayor aceptación y difusión no solo en Estados Unidos sino también en otros países con problemas de erosión.

La primera versión de esta ecuación fue inicialmente formulada por Wischmeier y Smith en 1978 y fue publicada posteriormente en su forma definitiva en el Manual 534 del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (del Tánago, 1991).

Debido a la práctica de diferentes estudios experimentales se dio a conocer la necesidad de modificar algunas formas de evaluar y calcular los factores de la ecuación, generando así una nueva denominada RUSLE (USDA, 1997). En esta última versión se toma como base una serie de datos experimentales más amplia para la determinación de cada factor que la compone.

Esta ecuación permite estimar la pérdida de suelo media anual en una superficie del terreno debido a la erosión superficial, laminar, bajo determinadas condiciones de clima, suelo, relieve, vegetación y usos del suelo. Sin embargo, una de las hipótesis que maneja esta ecuación es que la precipitación es el principal agente activo de la erosión superficial (Castillo & Estrada, 2016).

A partir del ensayo Inderbitzen y de las mediciones realizadas mediante una parcela hidroerosiva es posible estimar el factor de erodabilidad (K) de la ecuación universal de pérdida de suelo USLE, indicada en la Ecuación (2.8). Este factor indica la cantidad de suelo erosionado por unidad de lluvia.

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (2.8)$$

Donde:

A: pérdida de suelo media anual ($\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$);

R: índice de erosividad de la lluvia y la escorrentía ($\text{MJ cm ha}^{-1} \text{h}^{-1}$);

K: erodabilidad del suelo ($\text{ton ha h ha}^{-1} \text{MJ}^{-1} \text{cm}^{-1}$);

L: Factor longitud de la pendiente (adimensional);

S: Factor de la inclinación de la pendiente (adimensional)

C: factor de cubierta vegetal (adimensional);

P: factor de prácticas conservación, cultivo en contorno, fajas o terrazas (adimensional).

2.7.1 Factor de erosividad de la lluvia, R

Este es el factor que indica la influencia que tiene la energía cinética de la lluvia, disgregando las partículas del suelo y compactando su superficie. Es el índice que determina la aparición de escorrentía superficial cuando se supera la capacidad de infiltración del suelo (del Tánago, 1991).

Este índice puede calcularse empleando la siguiente expresión:

$$R = E * I_{30} \quad (2.9)$$

Donde:

E: energía cinética de la lluvia (julios/m²/por cm de lluvia). Se calcula empleando la ecuación (2.10);

I₃₀: intensidad máxima en treinta minutos de la lluvia (cm/h);

I: intensidad de lluvia (cm/h);

R: índice de erosividad de la lluvia y la escorrentía (julios/m²).

$$E = 210.2 + 89 * \log I \quad (2.10)$$

Para el cálculo de este valor se debe calcular la magnitud de R para cada lluvia de un mismo año, para luego realizar una suma de los R de cada lluvia ocurrida en un año y obtener finalmente la magnitud del índice de erosividad de la lluvia y la escorrentía, que debe ingresarse en la ecuación (2.8). Sin embargo, al tratarse de un valor promedio anual, esta magnitud tiende a ser constante para cada zona de estudio (del Tánago, 1991).

2.7.2 Factor de erodabilidad del suelo, K

Goldman y Jackson (1986) definen el factor de erodabilidad del suelo como una medida de la susceptibilidad de las partículas que lo componen a separarse y ser arrastradas por la lluvia y la escorrentía superficial, en función de sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

Este factor es la pérdida promedio de suelo en toneladas métricas por hectárea por unidad de EI, medido en parcelas unitarias de un suelo dado.

El factor de erodabilidad del suelo se puede estimar de forma directa por medio de una ecuación o de manera gráfica (Mancilla, 2008).

Para desarrollar el método de la ecuación, inicialmente se define el tipo de estructura del suelo y la permeabilidad de este, de acuerdo con USLE, las categorías y códigos según la estructura del suelo son cuatro y según la permeabilidad se presentan seis códigos. Estos se indican en la Tabla 8 y en la Tabla 9 respectivamente.

Tabla 8. Códigos de estructura del suelo USLE

Código USLE	Tipo de estructura
1	Granular muy fina
2	Granular fina
3	Granular media gruesa
4	Bloques, Laminar o Masiva

Nota: Reproducción de "Uso de la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE) en el campo forestal", por G. A. Mancilla, 2008, Apuntes de docentes facultad de ciencias forestales, p.15. Copyright 2008 Universidad de Chile, Facultad de ciencias forestales.

Tabla 9. Códigos USLE de permeabilidad del suelo

Textura	Permeabilidad (cm/s)	Clasificación
Arcilla limosa, arcilla	$< 2.8 \times 10^{-5}$	6 – Muy baja
Arcilla limosa, arcilla arenosa	2.8×10^{-5} a 5.6×10^{-5}	5 – Baja
Arcilla arenosa	5.6×10^{-5} a 1.4×10^{-4}	4 – Baja a moderada
Limo	1.4×10^{-4} a 5.6×10^{-4}	3 – Moderada
Arena arcillosa	5.6×10^{-4} a 1.7×10^{-3}	2 – Alta
Arena	$> 1.7 \times 10^{-3}$	1 – Muy alta

Nota: Reproducción de "Uso de la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE) en el campo forestal", por G. A. Mancilla, 2008, Apuntes de docentes facultad de ciencias forestales, p.15. Copyright 2008 Universidad de Chile, Facultad de ciencias forestales.

Una vez determinados los códigos del suelo por medio del análisis estructural de este, se calcula la ecuación K (Ton.ha.h/MJ.ha.mm), con base en la propuesta de (Wischmeier & Smith, 1978)

$$K = 0.137[2.1 \cdot 10^{-4}(12 - MO)M^{1.14} + 3.25(s - 2) + 2.5(p - 3)]/100 \quad (2.11)$$

Donde:

MO = % de materia orgánica del suelo;

s = código correspondiente a la estructura del suelo;

p = código correspondiente a la permeabilidad del suelo;

M es un factor determinado por los porcentajes de limo, arcilla y arena.

$$M = (\% \text{ limo} + \% \text{ arena fina}) \cdot (100\% - \% \text{ arcilla}) \quad (2.12)$$

Cabe resaltar que esta ecuación es válida para suelos que tienen 70% o menos de fracción limosa.

Según Carvalho (1994) los valores de $K_{USLE} < 0.15$ (t/ha/(t.m/ha.mm/h)) indican suelos de erodabilidad baja, entre 0.15 a 0.30 los suelos presentan una erodabilidad media y por encima de 0.30 ya clasifican como de erodabilidad alta.

La determinación de K por el método gráfico se realiza por medio del nomograma de Wischmeier y Cols (1971), el cual es una expresión gráfica de la Ecuación (2.11). Se necesitan cinco parámetros del suelo para utilizar el nomograma, el porcentaje de limos, porcentaje de arena fina, porcentaje de arena, contenido de materia orgánica, tipo de estructura del suelo y permeabilidad (Kirby, 1980).

2.7.3 Factor topográfico, LS

El factor LS describe el efecto combinado de la longitud de una pendiente (L) y su grado inclinación (S) en los suelos expuestos a la erosión laminar y en surcos. Su valor se obtiene al multiplicar los dos subfactores: longitud (L) y pendiente (S) (Goldman y Jackson, 1986). McCool et al. (1987 y 1989) & Foster et al. (1977), presentan las siguientes expresiones algebraicas para el cálculo de L y S:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m \quad (2.13)$$

$$m = \frac{\beta}{(1 + \beta)} \quad (2.14)$$

Donde:

$$\beta = \{(\text{sen } \theta / 0.0896) / [3.0(\text{sen } \theta)^{0.8} + 0.56]\} \cdot r$$

$$S = 10.8 \text{ sen } \theta + 0.03; \text{ para pendientes } < 9\%$$

$$S = 16.8 \text{ sen } \theta - 0.50; \text{ para pendientes } \geq 9\%$$

L = factor de longitud del terreno (adimensional)

λ = longitud uniforme del terreno m

m = exponente variable según β

β = relación erosión en surco a erosión entresurco

θ = ángulo de inclinación del terreno

r = coeficiente igual a: 0.5 en tierras forestales o pastizales; 1 en terrenos agrícolas y 2 en sitios de construcción.

S = es el factor de pendiente del terreno (adimensional)

Wischmeier y Smith (1978), presentan un gráfico que permite la estimación directa del factor LS, tal como se presenta a continuación.

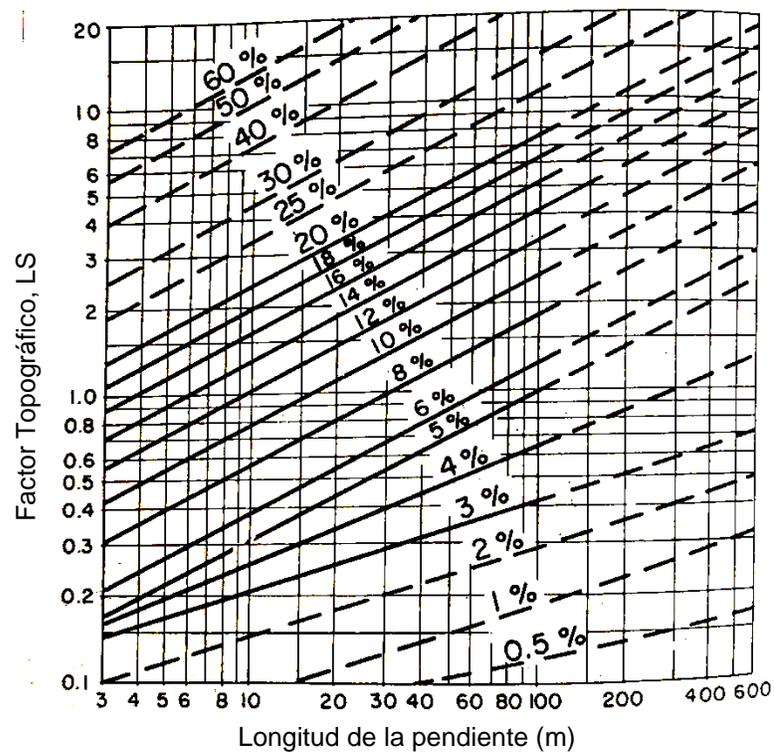


Figura 4. Factor de longitud y grado de pendiente, LS, para usarse con la Ecuación Universal de Pérdida de suelo. Adaptado de "Erosión de suelos", por M. J. Kirby, 1980, p.56. Copyright 1980 John Wiley & Sons.

2.7.4 Factor de uso del suelo, C

El factor C representa la relación de la cobertura vegetal con la pérdida de suelo. Se expresa como la relación entre la pérdida de suelo de un área con una vegetación específica y la pérdida de suelo de una parcela de labranza y barbecho continuo con iguales condiciones de pendiente y precipitación (Kirby, 1980).

La determinación del factor C, se realiza por medio de valores tabulados y no empleando ecuaciones. Wischmeier y Smith (1978) presentan distintas tablas por tipo de cultivo, etapas de desarrollo y sistema de manejo. Dividen también la clasificación en tres tablas: una para terrenos forestales sin deforestar, otra para terrenos de praderas permanentes, baldíos y bosques pastoreados y una última para áreas de bosques alteradas mecánicamente o con método de preparación de sitio (Kirby, 1980 & Mancilla, 2008).

Dissmeyer y Foster (1984) citados por Mancilla (2008), presentan que el valor C en terrenos forestales puede ser estimado evaluando una serie de nueve factores: proporción del suelo desnudo, cubierta del dosel, reconsolidación del suelo, alto contenido orgánico, raíces finas, efecto de enlace residual, almacenamiento in – situ, secuencia de saltos en terreno y labranza en contorno. El factor C total es el producto de los nueve subfactores. Sin embargo, es responsabilidad del evaluador determinar cuáles subfactores son aplicables a sus condiciones de sitio.

2.7.5 Factor de prácticas de conservación, Factor P

El factor P es la relación de suelo en un área donde se han realizado prácticas de conservación para el control de la erosión y la pérdida que se produce en la parcela, si las prácticas no se realizaran (Kirby, 1980).

La R_{USLE} incluye el factor P de prácticas de conservación para tres situaciones: el empleo de labranza siguiendo las curvas de nivel (cultivo en contorno), el empleo de fajas de cultivo en contorno y el empleo de terrazas (Mancilla, 2008).

Tabla 10. Factor P de prácticas de conservación

Pendiente (%)	Cultivo en contorno o curvas de nivel		P para cultivos en terrazas
	P*	Longitud máxima de ladera (m)	
1 – 2	0.60	122	0.12
3 – 5	0.50	91	0.10
6 – 8	0.50	61	0.10
9 – 12	0.60	37	0.12
13 – 16	0.70	24	0.14
17 – 20	0.80	18	0.16
21 – 25	0.90	15	0.18

* se pondera por 0.8 si considera contornos con pilas de residuos

Nota: Reproducción de "Uso de la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE) en el campo forestal", por G. A. Mancilla, 2008, p.49. Copyright 2008 Universidad de Chile.

3. Metodología

La metodología que se desarrolla en esta investigación consiste en la construcción de una parcela erosiva en campo sin cobertura superficial, susceptible a la acción de erosión laminar. La zona delimitada por la parcela será sometida a tres lluvias naturales y a partir de la acción del flujo laminar sobre el suelo, se recolecta la cantidad de agua y suelo acumulado al final de los eventos de lluvia. Se someten estas muestras a un proceso de secado y tamizaje del suelo con el fin de determinar la cantidad de partículas arrastradas por la acción de la lluvia, para finalmente determinar la erodabilidad en campo del suelo. De esta misma zona se recuperan muestras alteradas para ensayos de caracterización del material y muestras inalteradas en bloque, las cuales serán posteriormente empleadas en el ensayo Inderbitzen. Finalmente se ejecutan ensayos Inderbitzen en laboratorio sobre las muestras de suelo recuperadas, simulando las mismas condiciones de campo. Los resultados obtenidos mediante la parcela y el equipo Inderbitzen serán comparados.

3.1 Área en estudio

Para la ejecución de las actividades de campo, inicialmente se realizó un proceso de selección del predio y la ladera que serviría para las observaciones de la erosión. Considerando que en el período de tiempo en el que se desarrolló el presente trabajo ocurre la pandemia de COVID-19, la selección del predio dependía de los permisos de acceso, además de la posibilidad de instalarse en el sitio de estudio para así evitar interferencias debido a los “toque de queda” que realizó el gobierno para controlar la propagación del virus.

Finalmente se obtuvo la autorización de trabajar en un predio localizado en la Vereda Alto de la Virgen del Municipio de Guarne, en el cual podría además instalarse la investigadora para realizar las actividades de campo sin interrupciones debido a las restricciones de movilización ocasionadas por el COVID-19.

3.1.1 Localización

El área en estudio se encuentra ubicada en la vereda Alto de la Virgen, localizada en el Municipio de Guarne, perteneciente al Departamento de Antioquia. Las coordenadas del sitio son: 6°19'22.81"N, 75°27'13.66"O.

La selección de este predio se realiza con base en los siguientes criterios: posibilidad de estadía permanente para inspeccionar de manera constante la parcela, zona de precipitaciones durante todo el año, autorización para remoción de tierra para la adecuación de la parcela, seguridad de la zona y facilidad de transporte de personal y muestras. En la Figura 5 se presenta la ubicación del Municipio de Guarne en Colombia.



Figura 5. Localización del Municipio de Guarne en Colombia (Tomado de Google Earth 25/07/2021)



Figura 6. Localización del Municipio de Guarne en Antioquia (Tomado de Google Earth 25/07/2021)



Figura 7. Localización del Vereda alto de la virgen en Guarne (Tomado de Google Earth 25/07/2021)

El clima en el municipio de Guarne es generalmente cálido y templado. Se presentan precipitaciones durante todo el año, aún en el mes más seco. Su temperatura promedio es de 16.1°C y su precipitación promedio es de 2958mm (Climate-data.org, n.d.).

3.1.2 Marco geológico regional

En el marco geológico regional del municipio de Guarne, la principal formación presente es metamórfica, conocida como Anfibolita (Pza), y en zonas cercanas se identifican perfiles de meteorización de rocas ígneas del denominado Batolito Antioqueño (Ksta), depósitos aluviones recientes y depósitos eólicos (Castaño & Tobón, 2005).

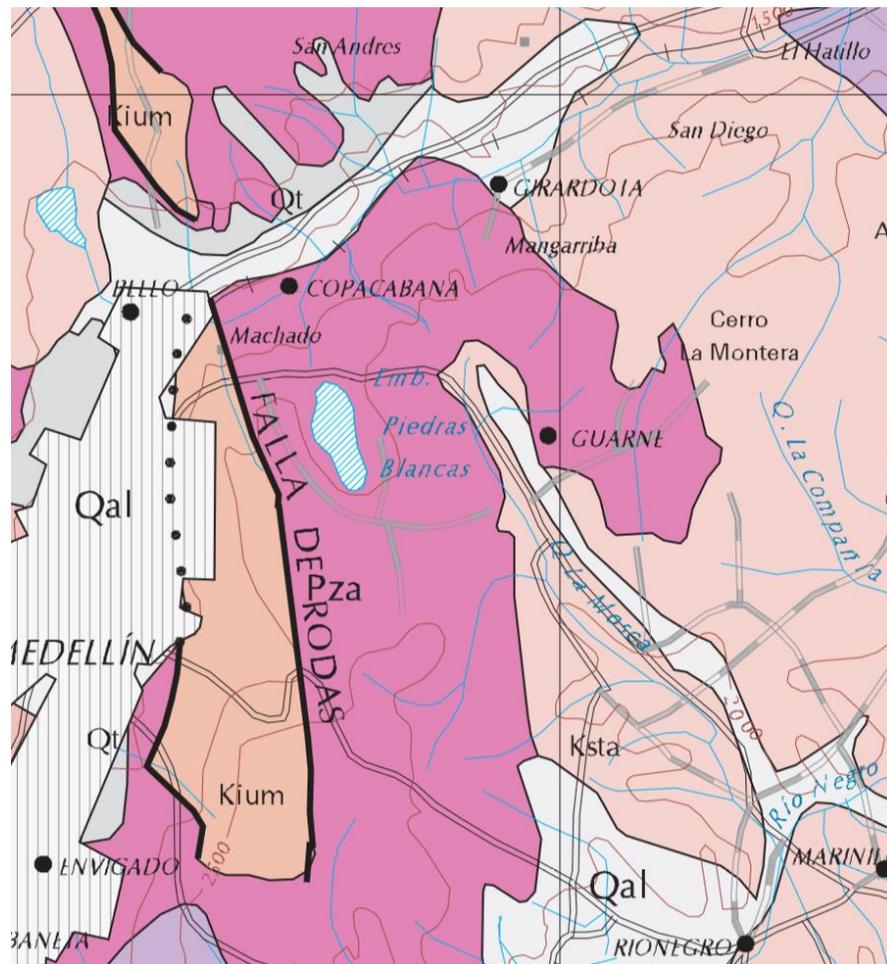
A continuación, se describe de manera general las unidades geológicas presentes en el área de estudio y sitios cercanos. La Figura 8 muestra la distribución de las formaciones geológicas mencionadas en esta zona del departamento de Antioquia.

- **Anfibolitas (Pza)**

Esta unidad se extiende desde la ceja en el sur hasta Belmira al norte, por aproximadamente 72km y con un ancho de 6km. Se encuentra constituida principalmente por hornblenda y feldespato, su grano varía de medio a fino. Estas rocas por lo general han sufrido un metamorfismo de medio a alto grado (A. Correa & Martens, 2000).

En el valle de Aburrá esta roca se encuentra meteorizada formando espesores de suelo reportados de hasta 20m. Dicho suelo se caracteriza por ser limoso. Los afloramientos de este se caracterizan por generar pendientes fuertes a moderadas (Universidad de Antioquia & Área metropolitana del Valle de Aburrá, 2012).

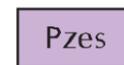
“La estructura de las anfibolitas varía de maciza a néisica y ligeramente esquistosa, bandeada por segregación metamórfica, de color negro a verde oscuro, moteada de blanco por la presencia de plagioclasa. Es una roca resistente a la meteorización y forma salientes topográficas notorias. Efectos térmicos por la intrusión de los cuerpos batolíticos pueden modificar la textura y la mineralogía de estas rocas, con minerales de más alto grado (Ingeominas, 2001).



Kiu: ULTRAMAFITAS DE ROMERAL
 Kium: DUMITAS DE MEDELLÍN
 Kum: ULTRAMAFITAS DE LA CORDILLERA OCCIDENTAL



TERRAZAS ALUVIALES



Esquistos cuarzo-sericíticos

Figura 8. Mapa Geológico del Departamento de Antioquia – INGEOMINAS. Tomado de Geología del Departamento de Antioquia Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear (1999)

- **Batolito Antioqueño (Ksta)**

Esta formación cubre un área mayor a 7221km² en el centro y parte oriental del departamento de Antioquia. Una de sus características principales es su litología homogénea con poca variación de un lugar a otro.

Su composición es característica de una cuarzdiorita. Los suelos residuales de este Batolito pueden tener más de 100m de profundidad e incluyen los horizontes IV a VI (Ingeominas, 2001).

- **Aluviones Recientes (Qal)**

“En este grupo de aluviones recientes se incluyen todos los depósitos generados 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).

3.1.3 Marco geológico local superficial

De acuerdo con Hermelin (1992), en estas zonas del Oriente Antioqueño es muy probable encontrarse espesores de ceniza volcánica, proveniente del macizo volcánico Ruiz – Tolima, sobre la cual finalmente se forma la capa de materia orgánica (Romaña et al., 2009).

Este tipo de suelos constituye el 0.84% de los suelos a nivel global y se encuentran en regiones tropicales (Shoji et al., 1993). Por otro lado, en Colombia aproximadamente el 11.6% del territorio cuenta con la presencia de este material, teniendo presencia en los departamentos de Antioquia, Caldas, Risaralda, Quindío, Tolima, Cauca y Nariño (Lizcano & Herrera, 2006).

Lo anterior se ve evidenciado en la zona de estudio seleccionada para la ejecución de la parcela hidroerosiva y la extracción de muestras para pruebas en laboratorio. Como lo indica la Figura 9, el área de interés contiene un espesor de materia orgánica de 30cm

aproximadamente seguido por una capa de ceniza volcánica cuyo espesor supera los 50cm según dos apiques realizados en cercanía a la parcela. Coincidente con lo descrito por Rendón et al. en consorcio Microzonificación sísmica (2006) para la región del oriente Antioqueño cercano que presenta un perfil de meteorización típico conformado por un horizonte superficial de color café oscuro a negro, con abundante materia orgánica, de 15 a 100 cm de espesor, subyaciendo una capa de ceniza volcánica, con estructura columnar, de espesores variables de hasta 150 cm, de coloraciones grises, pardas, verdes y cafés. Reposan directamente sobre saprolito, terrazas, líneas de piedra o rocas frescas.

Los taludes que se han conformado en otros predios de la zona permiten apreciar espesores de ceniza volcánica de hasta 1.50m. De manera preliminar y basándose únicamente en su textura y color se identifica un solo horizonte de dicha ceniza a lo largo de la profundidad mencionada.

Bajo estas consideraciones, la parcela de campo y las pruebas que se llevarán a cabo en laboratorio serán sobre el material caracterizado como ceniza volcánica localizado en la vereda Alto de la Virgen, en el municipio de Guarne.

Según el estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa e inundaciones en la zona urbana del municipio de Guarne realizado por la Universidad Católica de Oriente, en el municipio es común encontrar un depósito continuo de cenizas volcánicas meteorizadas, formadas por acumulaciones de productos volcánicos provenientes del complejo Ruiz-Tolima. Regionalmente las cenizas volcánicas presentan un contenido de Arcillas en un 74%; Limo en un 20%, Arena en un 6% y Materia Orgánica con un 21,8 % de la totalidad del suelo. Este suelo cuenta con un pH de 5.2 (Universidad Católica de Oriente, 2014).

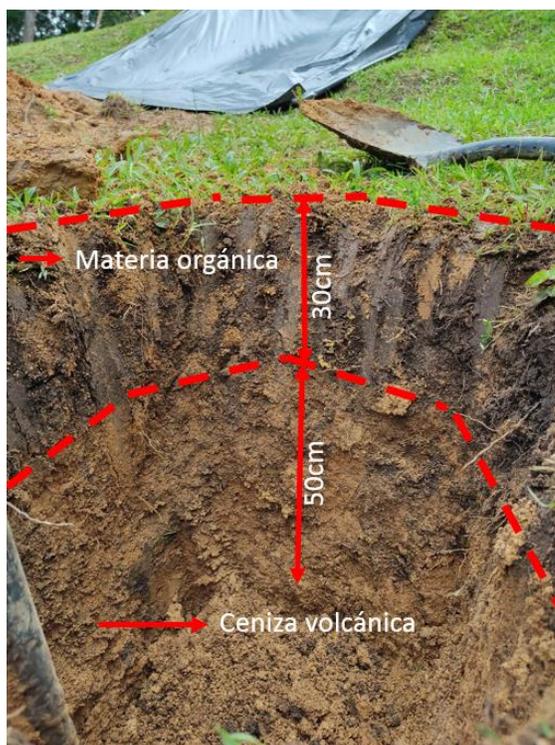


Figura 9. Perfil de suelo característico en el predio de estudio

Según (Fernandez & Santa, 1964) las cenizas volcánicas ubicadas en el oriente antioqueño se encuentran fuertemente meteorizadas dando origen a los suelos conocidos como andisoles del Oriente Antioqueño. En las cuencas del oriente antioqueño, las cenizas volcánicas están totalmente transformadas en arcillas.

La porosidad de este material identificada por diversos autores y su elevada permeabilidad secundaria debido al agrietamiento por desecación, que le confiere una estructura columnar, su posición en superficie, su espesor y su capacidad de campo, hacen del horizonte de andosoles un elemento clave en el proceso de infiltración (MADS et al., 2017). Algunas de las características que influyen en el estudio de la erodabilidad de este material se resaltan en el trabajo realizado por (Castaño & Tobón, 2005) sobre las cenizas volcánicas del Oriente Antioqueño ubicadas en el municipio de Rionegro. Las más relevantes para esta investigación se resumen a continuación:

- Su textura es predominantemente arcillosa y presenta una estructura columnar pobremente desarrollada.

- Sus horizontes de meteorización I y II presentan minerales como: vermiculita, montmorillonita, illita, hidrobiotita, actinolita, albita, magnosiohornblenda, vermiculita, clinocloro y gibsita.

3.2 Metodología empleada para la recolección de las muestras de suelo

Sobre la misma ladera se extraen muestras alteradas e inalteradas de suelo para llevar a cabo ensayos de caracterización y ensayos Inderbitzen.

Las muestras son extraídas a la izquierda de la parcela delimitada. En total se obtienen tres bolsas con muestras de suelo alterado y seis muestras en bloque de suelo inalterado. Para el caso de las muestras inalteradas se emplean cajones metálicos de 30cm x 30cm y 10cm de alto, además de anillos de 20cm x 20cm y 5cm de alto, como se aprecia en la Figura 11.

Debido a que seis de las muestras de suelo inalteradas serán empleadas para la ejecución de ensayos Inderbitzen, se realizan tres mini-parcelas al lado derecho de la parcela de prueba, llevando a cabo el mismo procedimiento. De estas mini-parcelas serán extraídas cada una de las muestras inalteradas una vez suceda el evento de lluvia en estudio. Tal y como se mencionó anteriormente, las mini-parcelas estarían también cubiertas por plástico y solo se destapan según el evento de lluvia deseado. Como la intención es que la humedad de la muestra inalterada sea similar al de la parcela, se lleva a cabo la siguiente metodología:

Evento de lluvia 1: Para este evento, se destapan las mini-parcelas 2 y 3. La mini-parcela 1 permanece cubierta para así conservar la misma humedad que tenía la parcela de prueba antes del evento de lluvia. De esta manera cuando el evento de lluvia 1 sea simulado en laboratorio sobre esta muestra inalterada, las condiciones iniciales serán las mismas de la parcela de prueba y podrán compararse sus comportamientos. De igual manera estas consideraciones serán revisadas y rectificadas una vez se inicien las pruebas Inderbitzen en laboratorio.

Evento de lluvia 2: Para este evento, la muestra inalterada 1 ya habrá sido extraída de la mini-parcela 1. Ahora se debe destapar únicamente la mini-parcela 3 y una vez finalizada la lluvia 2 extraer la segunda muestra inalterada de la mini-parcela 2, la cual estuvo cubierta durante este evento.

Evento de lluvia 3: Finalmente la mini-parcela 3 se mantendrá cubierta hasta que caiga el evento de lluvia 3. De allí se extrae la última muestra inalterada una vez finalizada la lluvia y tomada la muestra de agua más suelo obtenida de esta última medición.



Figura 10. Mini-parcelas ejecutadas para la extracción de muestras inalteradas



a)



b)

Figura 11. a y b) Extracción de muestras de suelo Inalteradas en cajas.

3.3 Ensayos de laboratorio

3.3.1 Caracterización física

El programa de ensayos realizado fue llevado a cabo en el Laboratorio de Geotecnia y Pavimentos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Para la caracterización del suelo en estudio se realizaron los siguientes ensayos:

- Contenido de humedad natural
- Granulometría mediante tamizado
- Granulometría con hidrómetro
- Límites de Atterberg
- Gravedad específica de los sólidos
- Índice de vacíos por balanza hidrostática

Contenido de humedad natural

Estos ensayos se llevaron a cabo según lo especificado en la norma ASTM D2216-10, sobre 14 muestras de suelo recuperadas del estrato superficial en estudio, correspondiente a ceniza volcánica.

Granulometría mediante tamizado

Se ejecutaron cuatro ensayos de granulometría luego de hidrómetro siguiendo el procedimiento especificado en la ASTM D422-63. Lo anterior se ejecuta en dos de los casos empleando defloculante sobre la muestra y sin emplearlo en los dos restantes.

Límites de Atterberg

De igual manera se estiman los límites de Atterberg en cada una de las muestras examinadas por tamizado. El procedimiento se realiza según la norma ASTM D4318-10. Se estima además el límite de contracción con base en la norma ASTM D4943-18.

Gravedad específica

Se realiza esta prueba según los lineamientos indicados en la norma ASTM D854-10.

Balanza hidrostática

Fueron realizados 10 ensayos sobre muestras inalteradas de suelo con el fin de conocer su peso específico seco. A partir de este dato y las magnitudes de G_s obtenidas en el ensayo de gravedad específica es posible estimar la relación de vacíos con base en la Ecuación (3.1).

$$e = \frac{G_s * \gamma_w}{\gamma_d} - 1 \quad (3.1)$$

Donde:

e = relación de vacíos del suelo.

G_s = gravedad específica del suelo.

γ_w = peso específico del agua (gr/cm^3).

γ_d = peso específico seco del suelo (gr/cm^3).

Ensayo de doble hidrómetro

Esta prueba puede ser empleada en suelos que tengan más de un 12% de contenido de arcilla (partículas con un diámetro menor a 0.002mm). Se emplea para comparar las curvas granulométricas del suelo con y sin defloculante. A partir de esto es posible conocer el porcentaje de dispersión como la relación del porcentaje de partículas de diámetro menor a 0.002mm teniendo en cuenta ambas curvas y también permite analizar el estado de agregación del suelo.

Empleando los datos que proporcionan las curvas granulométricas, se calcula el porcentaje de dispersión empleando la Ecuación (3.2)

$$\text{Porcentaje de dispersión (\%)} = \frac{A}{B} * 100 \quad (3.2)$$

Donde:

A = porcentaje, en masa, de las partículas de arcilla determinadas en el ensayo de hidrómetro sin defloculante;

B = porcentaje, en masa, de las partículas de arcilla determinadas en el ensayo de hidrómetro con defloculante;

Un porcentaje de dispersión igual al 100% indica una fracción de arcilla completamente dispersiva, y un porcentaje de dispersión igual a cero indica una arcilla completamente no dispersiva (ABNT, 1996).

El tenor de agregación del suelo se calcula empleando la Ecuación (3.3).

$$TA (\%) = \frac{B - A}{B} * 100 \quad (3.3)$$

Donde:

A: porcentaje de arcilla sin defloculante (partículas < 0.002mm);

B: porcentaje de arcilla con defloculante (partículas < 0.002mm).

Adicionalmente se determinaron dos parámetros químicos del suelo el Potencial de hidrógeno y la Capacidad de Intercambio Catiónico

Potencial de hidrógeno – pH

El pH es una propiedad química que mide el grado de acidez o alcalinidad de las soluciones acuosas. El pH del suelo es una medición sencilla que proporciona datos significativos del suelo como su composición, génesis, fertilidad, entre otros (Basilio et al., 2003).

Las propiedades químicas del suelo como pH y el intercambio catiónico controlan la estabilidad de los minerales, agregados y cementantes. En grandes rasgos, cuando el suelo es ácido tiene características de agregación y, cuando es básico, tiene efecto de desagregación (Camapum de Carvalho et al., 2006).

El ensayo se realiza con el método A descrito en la norma ASTM D4972-19, se toman los valores exactos registrados en el pH-metro, con una precisión de 0.02 unidades de pH. El equipo se calibra previamente a realizar las medidas.

Con la diferencia entre el pH en KCL y pH en agua, es posible determinar el predominio de ciertos minerales en el suelo (Ver Ecuación (3.4)).

$$\Delta pH = pH_{KLC} - pH_{H_2O} \quad (3.4)$$

Según Kiehl (1979) citado por Camapum de Carvalho et al. (2006), un valor de ΔpH negativo indica predominio de arcillas silicatadas y/o arcillominerales, mientras que, un ΔpH positivo se relaciona con un predominio de óxidos de hierro y aluminio. Por otro lado,

un ΔpH negativo, indica que la cantidad de aluminio intercambiable es alta, y cuando es positivo, la cantidad es baja.

Ensayo de Capacidad de Intercambio Catiónico Efectivo

El ensayo fue ejecutado por el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. En la Tabla 11 se indican los métodos empleados para la estimación de cada una de las variables. Este ensayo consiste en la medida de la carga negativa permanente que corresponde a la suma de bases de cambio (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+1} , Na^{+1}) y otros cationes como el ión amonio, cuando el pH es superior a 5.5 o por una asociación de éstas con acidez intercambiable (Al^{+3} , H^{+1}), cuando el pH es inferior a 5.5.

Tabla 11. Métodos empleados para la determinación de la variable

Variable	Símbolo	Unidad	Método
pH	pH	-	NTC 5264-2018
Calcio	Ca	cmol(+)/kg	NTC 5349-2016
Magnesio	Mg	cmol(+)/kg	NTC 5349-2016
Potasio	K	cmol(+)/kg	NTC 5349-2016
Acidez Intercambiable (Aluminio)	Al	cmol(+)/kg	NTC 5263-2017
Fósforo	P	mg/kg	Método interno
Capacidad de Intercambio Catiónica Efectiva	CICE	cmol(+)/kg	NTC 5268-2014

3.3.2 Caracterización mineralógica y estructural

Difracción de rayos X

La técnica de difracción de rayos X es altamente utilizada para caracterizar materiales de estructura cristalográfica definida. La información recolectada de la interacción entre los rayos X y los cristales, se basa en la difracción producida por un grupo de átomos en un arreglo organizado. La técnica de difracción utiliza muestra pulverizada o policristalina, en donde las partículas diminutas se encuentran orientadas al azar y se exponen a una radiación de rayos X monocromática. Como cada partícula es un cristal, al estar orientados libremente, se asegura que algunas partículas se encuentren orientadas de tal forma que sus planos cristalográficos cumplan las condiciones para la difracción (Justo & Morillo González, 1999).

La muestra se pulveriza en un mortero, de tal forma que pase el total de su peso por el tamiz N°200. Después se llena el portaobjeto de aluminio con la muestra en polvo y este se coloca en el equipo. Este procedimiento se llevó a cabo en el grupo de catalizadores y adsorbente de la Universidad de Antioquia.

Los ensayos se realizaron en el Difractómetro de Rayos X (DRX) Malvern-PANalytical Modelo Empyrean 2012, con detector Pixel 3D y fuente de Cu ($\lambda=1.541$) a 45kV y 40mA; Goniómetro: Omega/2 theta y configuración de la plataforma: Reflexión Transmisión Spinner girando a 4 rpm. El paso fue de $0,03^\circ$ y un tiempo por paso de 50s. La identificación se realizó usando el software High Score Plus mediante el método Rietveld y la base de datos: ICSD FIZ Karlsruhe 2012-1.

Adicionalmente, al suelo en su humedad natural y secos al aire se le tomaron fotografías con una lupa de alta resolución. Estas fotografías permiten visualizar características estructurales del material.

3.3.3 Caracterización hidro/mecánica

Permeabilidad

Se ejecutan ensayos de permeabilidad empleando el método de cabeza variable, de acuerdo con lo indicado en la norma técnica ASTM D2434-19. Una vez ejecutado el procedimiento, se emplea la Ecuación (3.2) para conocer la magnitud de la permeabilidad saturada.

$$k = \frac{a * L}{A * t} * \ln\left(\frac{h1}{h2}\right) \quad (3.5)$$

Crumb test

Este es un método práctico y rápido que permite identificar la dispersabilidad del suelo. El ensayo se lleva a cabo teniendo en cuenta los lineamientos indicados en la normativa ASTM D6572-20, empleando cuatro muestras de suelo denominadas como M1, M3, M3 y M4, todas ellas bajo las condiciones de humedad natural.

El procedimiento consiste en sumergir un terrón de suelo en forma de cubo cuyo lado es de 20mm, en 250mL de agua destilada por períodos de 10min, 20min, 30min, 60min y 24h; verificando para cada tiempo el estado de turbidez del agua y la estructura de la muestra.

Finalmente se obtiene el grado de dispersión relativo a la turbidez del agua, según la siguiente clasificación:

- Grado 1 – No Dispersivo – Sin reacción: el terrón puede fracturarse, pero no hay turbidez debido a los coloides suspendidos en el agua. La sedimentación de partículas se determina dentro de la hora de prueba.
- Grado 2 – Ligeramente Dispersivo – Pequeña reacción: ligera turbidez debido a una suspensión coloidal casi imperceptible alrededor de la superficie del terrón.
- Grado 3 – Moderadamente Dispersivo – Reacción moderada: una nube de suspensión coloidal claramente visible alrededor del terrón.
- Grado 4 – Altamente Dispersivo – Fuerte reacción: densa nube de suspensión coloidal.

Autores como (Bastos, 1999) indican que el *Crumb test* o ensayo de desagregación funciona de manera adecuada para obtener un criterio preliminar en la validación de la erodabilidad de un suelo.

Curva característica de succión

Para la obtención de la curva característica de succión del suelo, se emplea el método del Papel Filtro según las indicaciones dadas en la ASTM D5298-92. Este procedimiento se realiza en cinco muestras de suelo a diferentes humedades, con el fin de conocer el comportamiento del suelo no saturado objeto de estudio.

Como se sabe, la succión total está constituida por dos componentes: succión matricial y succión osmótica. La primera depende del tamaño y la distribución de las partículas mientras que la segunda está relacionada con la concentración de sales en el suelo. Para la determinación de la matricial, se dispone el papel filtro en contacto con la muestra; mientras que para la total se emplea una rejilla que permite la separación entre el suelo y el papel. El conjunto de muestra y papel filtro se envolvió en papel aluminio (Ver Figura 12) y se almacenó en un contenedor de icopor durante 15 días.

Es importante mencionar que para cada muestra se emplean un total de cuatro círculos de papel filtro, dos de ellos grandes y el resto pequeños, como puede verse en la Figura 13, con el fin de corroborar las medidas de humedad obtenidas en cada caso. Para el registro

de la succión matricial se emplea un papel filtro grande y uno pequeño, al igual que para la medida de la succión total.

Después de este tiempo los papeles de filtro se retiraron de las muestras, pesándola dentro de la báscula cerrada herméticamente con precisión de 0.0001g, la cual se indica en la Figura 14. Posteriormente, el papel filtro se secó en un horno a una temperatura que osciló entre 105 y 110°C durante 24 horas y se pesó nuevamente el conjunto. La diferencia entre ambos pesos permite conocer la masa del papel filtro y, en consecuencia, su humedad.

Para conocer el grado de saturación de la muestra se emplea la magnitud de vacíos identificada anteriormente en el ensayo de balanza hidrostática.

A partir de los datos obtenidos por el método de papel filtro y la balanza hidrostática, se construye la curva característica del suelo, siendo esta gráfica una relación entre la cantidad de agua presente en los vacíos del suelo y la succión, tanto matricial como total. También se grafica la relación entre la succión y el grado de saturación del material.

Para la representación matemática de los datos experimentales de la curva de succión, se utilizaron las ecuaciones de Chandlet et al. (1992), dadas por las expresiones indicadas en (3.4) y (3.5).

$$\text{Para } \%w_{\text{papel}} \leq 47\% \quad (3.2)$$

$$\text{succión (kPa)} = 10^{4.84 - 0.0622 * w\%}$$

$$\text{Para } \%w_{\text{papel}} > 47\% \quad (3.3)$$

$$\text{succión (kPa)} = 10^{6.05 - 2.48 * \log(w\%)}$$



Figura 12. Muestras de suelo para ensayo de Papel filtro



Figura 13. Conjunto de papeles filtro empleados en cada muestra



Figura 14. Balanza, precisión 0.0001g

Corte directo consolidado drenado (CD)

Se ejecutan ensayos de corte directo bajo la modalidad consolidado drenado, empleando el procedimiento indicado en la ASTM D3080-11. Se realizan dos ensayos, el primero permitiendo la saturación total de las muestras y el segundo partiendo de su humedad natural.

Las envolventes de falla fueron definidas a partir de ensayos con tensiones normales iguales a 60kPa, 120kPa y 240kPa. Los valores de esfuerzo cortante adoptados se refieren a valores pico.

3.4 Evaluación de la erodabilidad: parcela hidro-erosiva

El predio seleccionado se encuentra sobre una ladera. Para la determinación de su pendiente se realizó un levantamiento del talud con cinta métrica y nivel topográfico. La topografía obtenida se presenta en la Figura 16. A partir de esta es posible apreciar que su pendiente promedio es de 0.80H:1V, equivalente a un ángulo de inclinación igual a 50° .



Figura 15. Levantamiento de la parcela de campo con cinta métrica y nivel topográfico

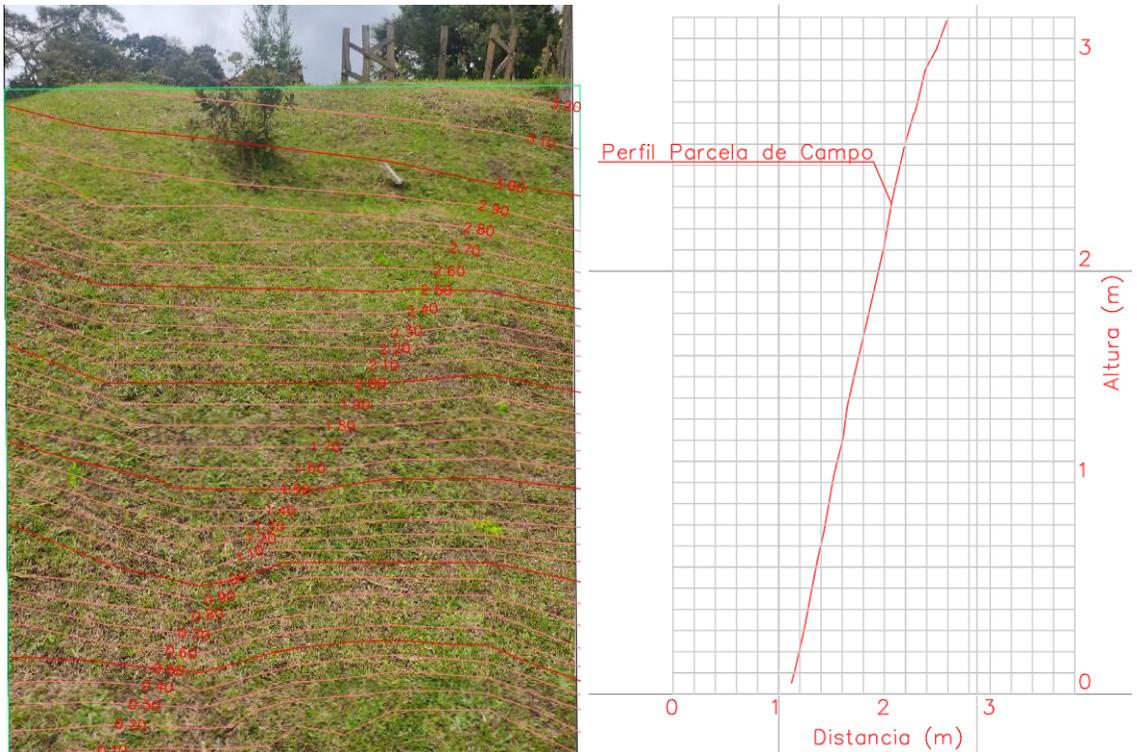


Figura 16. Topografía de la Ladera - Parcela de Campo

Posterior al levantamiento topográfico, fotográfico y geológico superficial de la ladera, se procede con la adecuación y delimitación de la parcela de prueba, cuyo largo y ancho es de 2m x 2m. Para ello se retira la capa de materia orgánica de 30cm de espesor aproximadamente y se realiza la excavación hasta un nivel tal que todo el suelo que compone la superficie de la parcela pertenezca a la misma formación (Ver Figura 17).

Las paredes que se conforman a partir de esta excavación se recubren en material plástico para evitar el desprendimiento de suelo desde estas paredes hacia el interior de la parcela. Con el objetivo de recolectar el material que sea desprendido y transportado por la escorrentía a lo largo de la parcela, se instala en la parte inferior un canal fabricado en hoja metálica de zinc cuya pendiente permite la recolección final del suelo más agua en un balde dispuesto a unos 50cm por debajo de la entrega del canal. Finalmente se retira de manera permanente cualquier elemento que pueda interrumpir con la caída de la escorrentía sobre la parcela (Ver Figura 18).



Figura 17. Proceso de construcción de la parcela de prueba



Figura 18. Parcela de prueba - Medida de la erosión en campo

El objetivo final será recolectar la mezcla de agua y suelo en el balde dispuesto, producto de cada evento de lluvia. Para esto fue necesario mantener el área cubierta con plástico de tal manera que no le ingresara agua a la parcela, al canal o al balde; y sólo era descubierta cuando ocurría un evento de lluvia cuya intensidad proporcionara un desprendimiento visualmente significativo de material de la parcela. Durante cada evento fue necesario mantener cubierto el balde por medio de una sombrilla, con el objetivo de que allí solo fuera recolectada el agua de escorrentía que produjo el desprendimiento del suelo de la parcela.

Para conocer la cantidad de suelo erosionado durante cada uno de los eventos de lluvia analizados, se lleva al laboratorio de Geotecnia y pavimentos de la Universidad Nacional de Colombia los tres recipientes recolectores con el contenido de agua y suelo acumulado por lluvia. Se registra el peso del recipiente con agua y suelo, el peso del recipiente y se procede a secar la cantidad total de agua más suelo en los hornos. Finalmente se conoce el peso del suelo seco erosionado en cada una de las lluvias.

Para conocer la magnitud de la intensidad de la lluvia en cada uno de los eventos registrados, se verifica el volumen de agua recolectado en el pluviómetro dispuesto alrededor de la parcela. Después de cada evento registrado se mide el contenido en un vaso graduado de 1000mL y con estos resultados es posible obtener la intensidad de la lluvia promedio empleando la Ecuación (3.4)

$$I = \frac{V_{pl}/A_{pl}}{t} \quad (3.4)$$

Donde:

I: intensidad pluviométrica (mm/h);

V_{pl} : volumen recolectado en el pluviómetro (mL);

A_{pl} : área de la sección transversal del pluviómetro (cm²);

t: tiempo total de duración del evento (h).

La tasa de pérdida de suelo por unidad de área de la parcela podrá estimarse de acuerdo con la expresión (3.5)

$$P_s = \frac{Q * C_s * t}{A} \quad (3.5)$$

Donde:

Ps: tasa de pérdida de suelo (kg/ha);

Q: caudal de lluvia (l/s), el cual se obtiene como la multiplicación entre la intensidad de la lluvia y el área de la parcela;

C_s : concentración de sedimentos (kg/l), el cual se obtiene dividiendo la masa de suelo seco arrastrado (M_{ss}) por el volumen de escorrentía;

t: duración de la lluvia (s);

A: área de la parcela (ha).

La tasa de desagregación del suelo estaría determinada por la Ecuación (3.6).

$$D = \frac{M_{ss}}{A * t} \quad (3.6)$$

Donde:

D: tasa de desagregación del suelo (kg/m² s);

M_{ss} : masa del suelo seco desagregado (kg);

A: área de la parcela (m²);

t: duración de la lluvia (s).

El índice de erosividad dado en g/cm²/cm de lluvia puede estimarse de la siguiente manera:

$$I.E = \frac{M_{ss}/A}{P} \quad (3.7)$$

Donde:

M_{ss} : masa del suelo seco desagregado (g);

A: área de la parcela (cm²);

P: precipitación (cm).

3.5 Evaluación de la erodabilidad: ensayo Inderbitzen

El equipo desarrollado en el presente trabajo con el fin de estimar la pérdida de suelo por unidad de área está basado en el equipo propuesto por Inderbitzen (1961).

La versión que se indica en este estudio consiste en una rampa metálica en aluminio con una abertura cuadrada para la fijación de las muestras de suelo a ensayar, de tal manera de que la cara superior de la muestra coincida con el nivel de la rampa. Esta muestra de suelo será sometida a un flujo de agua laminar controlado, el cual en consecuencia generará la erosión superficial del suelo en un determinado tiempo.

Tal como se indica en la Figura 19 y Figura 20, la rampa se encuentra apoyada en una estructura metálica que permite su articulación con el fin de poder variar el ángulo de inclinación de la rampa.

Se emplean dos perfiles metálicos sobre la longitud de la rampa con el fin de garantizar que el flujo que desciende por ella coincida exactamente con el ancho de la muestra.

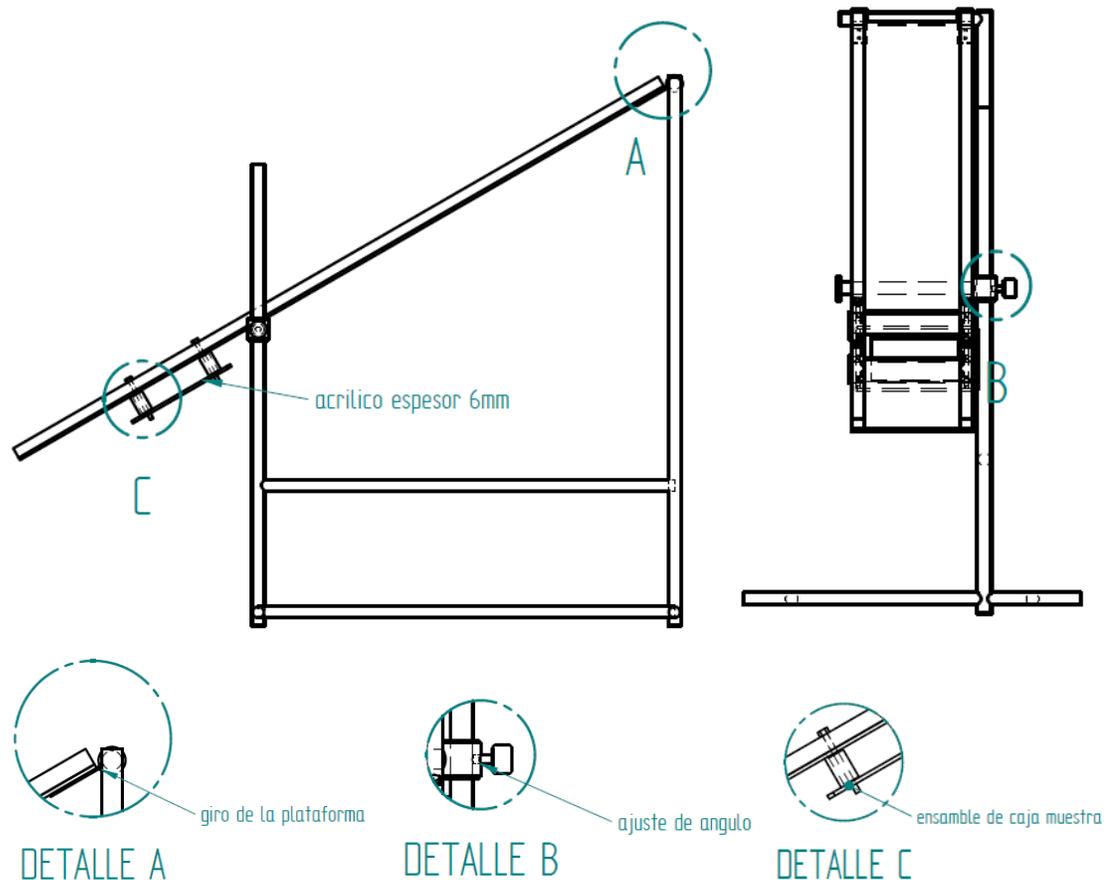


Figura 19. Esquemas montaje Equipo Inderbitzen

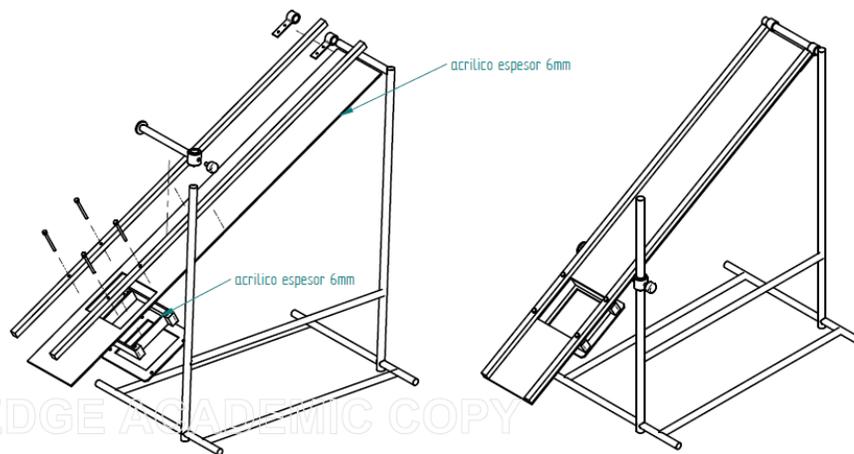


Figura 20. Isométrico Esquemas Equipo Inderbitzen

Es importante resaltar que este aparato no se encuentra estandarizado y existen varias metodologías que se pueden utilizar para ejecutar e interpretar los resultados de la prueba.

3.5.1 Montaje del equipo Inderbitzen

La rampa Inderbitzen fue fabricada en aluminio con 4.0mm de espesor, 0.25m de ancho y 1.70m de longitud. El orificio donde se fija la muestra es cuadrado con lado igual a 0.20m (Ver Figura 21).



Figura 21. Rampa con orificio cuadrado de lado igual a 20cm

Antes de cada prueba se verifica la nivelación de la rampa y su ángulo de inclinación, usando un nivel de aire y un transportador.

Para la simulación de la escorrentía superficial, se emplea un tubo de PVC perforado con orificios de $\frac{1}{2}$ " distribuidos cada 2cm (Ver Figura 22). La apertura para la fijación de la muestra de suelo se ubica a 100cm del inicio de la escorrentía.



Figura 22. Tubo en PVC perforado para la simulación de la escorrentía superficial

El ensayo Inderbitzen establece que el aparato debe asegurar una condición de flujo uniforme en régimen supercrítico sobre la superficie del espécimen de suelo. Este flujo uniforme corresponde a una velocidad de flujo constante en cualquier instante y en cada punto a lo largo del canal, incluyendo el área de la muestra. Por su lado, el régimen supercrítico permite la reproducción de esfuerzos cortantes hidráulicos uniformes y controlados a lo largo de la superficie del suelo (de Oliveira et al., 2021).

Los caudales por suministrar en la prueba son comprobados mediante el método volumétrico, teniendo tres aforos de cada caudal. Se toma el volumen de agua recolectado en un tiempo determinado hasta obtener tres medidas de caudal similares con una tolerancia de $2\text{cm}^3/\text{s}$.

Dicha calibración del caudal se lleva a cabo una vez se ha cubierto la muestra con una película de papel vinipel. Se permite que el agua fluya por la rampa hasta tener la magnitud

de caudal requerido y observar la uniformidad del régimen de flujo. El comienzo de la prueba se establece cuando se retira con cuidado la película protectora.

3.5.2 Caja de muestra

Para acoplar la muestra de suelo a la rampa se fabrica una caja en acrílico cuyos lados internos son de 20cm x 20cm y 5cm de altura. Se construye de tal manera que todos sus laterales y base puedan retirarse con el fin de acoplar más fácilmente la muestra de suelo inalterada. Esta muestra se extrae empleando anillos metálicos (Ver Figura 23), los cuales serán introducidos dentro de la caja de acrílico, junto con la muestra de suelo.

La caja de acrílico se ensambla con la rampa mediante un juego de tornillos que permiten una fijación total de la caja a la rampa, previniendo al máximo las infiltraciones de agua por la zona de conexión entre la caja y la rampa.



Figura 23. Anillo para extracción de muestras inalteradas

3.5.3 Preparación de las muestras

Para la ejecución de este trabajo se tienen dos grupos de simulaciones: el primer grupo consiste en la variación de la pendiente de la rampa mientras el caudal y las condiciones de humedad de la muestra se mantienen constantes. El segundo grupo propone la variación de los caudales dejando constante la pendiente de la rampa y sus condiciones de humedad.

Para ambos casos se realizan procedimientos de secado y humedecimiento de las muestras de tal manera que sus humedades naturales, se encuentren en un valor similar entre sí, es decir, las tres muestras empleadas en los ensayos de caudal constante tendrán el mismo contenido de humedad. Así mismo, las tres muestras utilizadas en los ensayos de pendiente constante tendrán humedades iguales.

Cada una de las muestras es introducida junto con el anillo metálico a la caja de acrílico, acto seguido se asegura la muestra en la rampa y se procede a enrasar la superficie del suelo con el nivel de la rampa (Ver Figura 24).



Figura 24. Ensamblaje de la muestra de suelo a la rampa Inderbitzen

3.5.4 Ejecución de ensayos: caudal constante, pendiente variable

Se toman tres muestras inalteradas de suelo y se llevan al mismo contenido de humedad, bien sea agregando agua a su estructura o generando el secado sobre los hornos del laboratorio. En este caso se pretende emplear una humedad diferente a las condiciones de campo, con el objetivo de comparar más adelante muestras bajo las mismas condiciones de pendiente y caudal, pero con humedades y succiones diferentes. Para este fin se toma la humedad de cada muestra y se uniformizan todas a la humedad más alta registrada, que para este caso fue de 61%. Cada una de las muestras serán ensayadas a una pendiente diferente, fijándose en 10°, 30° y 45°. A su vez, todas ellas estarán sometidas a la misma magnitud de caudal.

Para la elección del caudal a emplear en el ensayo, se fija la pendiente más inclinada en la rampa y se suministra el caudal aumentándolo hasta que la lámina de agua que se forma sobre la superficie del Inderbitzen se observe laminar y uniforme. En ese punto se toman tres medidas volumétricas del caudal para conocer su magnitud y se verifica mediante la teoría de hidráulica de canales abiertos, que el flujo sea uniforme, laminar y se encuentre en régimen supercrítico. Estas condiciones de flujo son condicionantes para la correcta ejecución e interpretación de los resultados obtenidos mediante el equipo Inderbitzen.

Una vez se ha verificado la pendiente de la rampa y la magnitud del caudal suministrado, se procede a iniciar el ensayo. Para ello se retira la lámina de papel "vinipel" de la muestra y se inicia la recolección de agua y suelo al final de la rampa. El tiempo final del ensayo se fija en 25min ya que para este tiempo se observa que el agua ha generado varios surcos sobre la muestra de suelo, lo que modifica las condiciones de flujo del ensayo por lo cual no podríamos asegurar que la medida tomada corresponda a erosión superficial. Además, en este tiempo se observa que tiende a producirse una estabilización de la pérdida de suelo.

Con el fin de conocer la evolución de la erosión en el tiempo, se recolecta material después de 1min, 3min, 5min, 10min, 15min, 20min y 25min; empleando para cada intervalo un recipiente diferente para la recolección del agua y el suelo Figura 28. Cada uno de estos contenedores se dejará reposar hasta que el suelo se encuentre en la parte inferior del recipiente para así poder retirar el agua en exceso de la parte más superficial. Dicha agua es filtrada por el tamiz #200 con el fin de no perder material fino. La cantidad restante de agua y suelo serán llevados a un horno aproximadamente a 105°C durante al menos 24h.

Finamente se registra el peso del material seco y se realiza un análisis granulométrico empleando las mallas #4, #10, #40, #100 y #200.



Figura 25. Recipientes empleados para la recolección del suelo + agua en cada intervalo de tiempo

3.5.5 Ejecución de ensayos: pendiente constante, caudal variable

El procedimiento llevado a cabo es similar al anteriormente mencionado. Para este caso las tres muestras de suelo serán llevadas a la misma humedad igual al 87%, siendo esta la humedad promedio registrada en la parcela de campo. De igual manera se fijará la pendiente observada en campo, siendo igual a 50° .



Figura 26. Montaje Ensayo Pendiente constante $S=50^\circ$

Se establece que el caudal menor a emplear en la prueba será el mínimo que permita generar un flujo laminar uniforme sobre la rampa. A partir de éste se aumenta el suministro de agua para generar el segundo y tercer caudal de prueba. De igual manera se toman tres medidas volumétricas para el caudal a suministrar por ensayo (Ver Tabla 38) y se verifica que bajo las condiciones establecidas el flujo de agua sea laminar, uniforme y supercrítico (Ver Tabla 42).

La duración del ensayo y el método de recolección de las muestras de suelo y agua es exactamente el mismo indicado en el ítem anterior.

4. Resultados y análisis de resultados

4.1 Caracterización física

A continuación, se presentan los resultados y el análisis del comportamiento esperado del suelo ante la erosión, con base en su caracterización física y química.

En la Tabla 12 se muestran los resultados obtenidos relacionados con la caracterización física del suelo superficial en estudio.

Tabla 12. Resumen propiedades físicas de las muestras de suelo analizadas

PROPIEDAD FÍSICA		Cantidad ensayos	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Min.	Max.	Prom.
Humedad higroscópica muestra seca al aire (%)		3	4.3	4.2	4.3			4.3
Humedad natural, W_{nat} (%)		14				52.6	69.6	61.9
Límite líquido LL seco al aire (%)		3	65.5	65.9	66.2			65.9
Límite líquido LL humedad natural (%)		3	72.0	78.7	77.9			76.2
Límite plástico LP seco al aire (%)		3	42.2	45.2	44.8			44.1
Límite plástico LP humedad natural (%)		3	46.7	52.3	56.0			51.7
Índice de plasticidad IP seco al aire (%)		3	23.3	20.7	21.4			21.8
Índice de plasticidad IP humedad natural (%)		3	25.3	26.4	21.9			24.5
Límite de contracción (%)		3	31.0	32.8	26.9			30.3
Hidrómetro con agua (%)	Contenido de gravas	3	5.2	7.4	6.3			6.3
	Contenido de arenas		29.7	28.9	30.3			29.6
	Contenido de limos		55.1	60.6	50.5			55.4
	Contenido de arcillas		9.9	3.2	12.9			8.7
Hidrómetro con defloculante (%)	Contenido de gravas	3	12.5	15.2	5.2			11.0
	Contenido de arenas		26.6	25.1	31.1			27.6
	Contenido de limos		32.6	32.4	39.3			34.8
	Contenido de arcillas		28.3	27.2	24.5			26.7
Gravedad específica, G_s		3	2.62	2.69	2.63			2.65
Peso unitario húmedo, γ_h (kN/m³)		3	11.40	11.44	10.54			11.1
Peso unitario seco, γ_d (kN/m³)		3	12.70	13.00	13.20			12.97
Clasificación según USCS		3	MH	MH	MH			MH

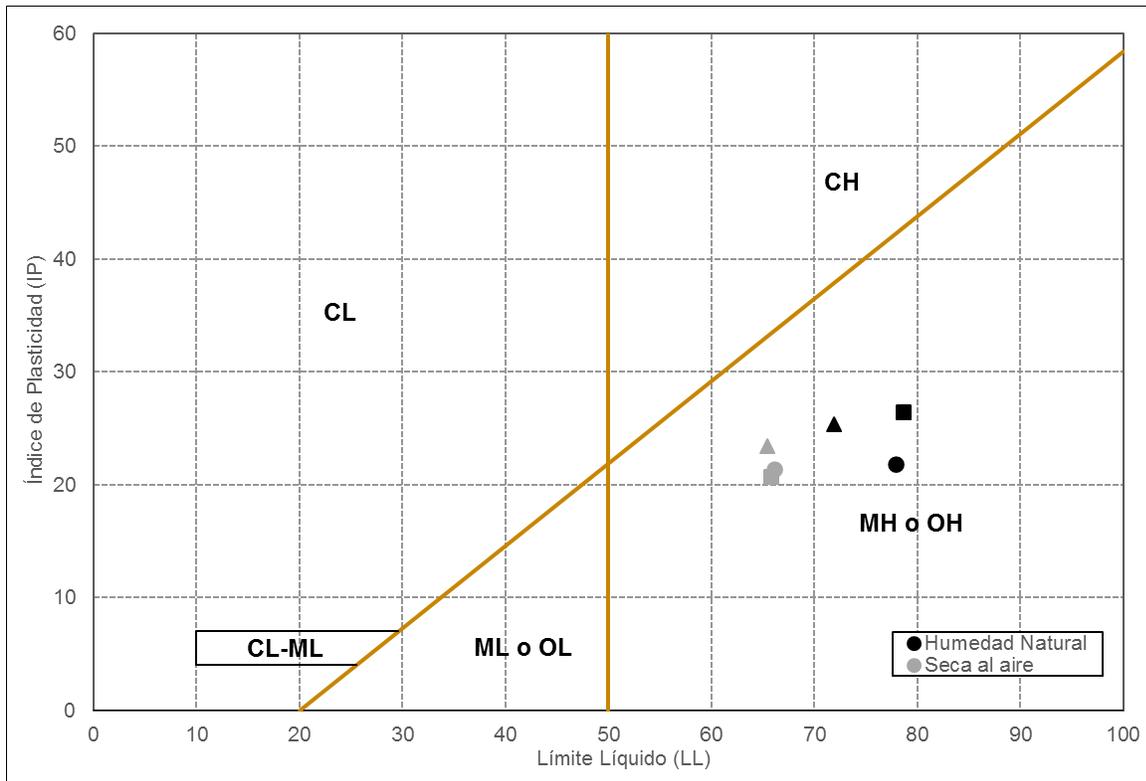


Figura 27. Carta de plasticidad de Casagrande para el suelo superficial

De la carta de plasticidad se observa que los límites obtenidos mediante la muestra seca al aire se ubican más a la izquierda que los encontrados a partir de la humedad natural del material. Sin embargo, la diferencia que presentan las muestras de ambos procedimientos no es suficiente como para que la plasticidad pase de alta a baja, conservándose todos los puntos estudiados en el rango de MH.

La clasificación MH indica un material de alta compresibilidad. Más adelante se expone que el suelo cuenta con un arreglo estructural del tipo floculado, siendo muy probable que sea este factor quien determine la alta compresibilidad del suelo.

4.1.1 Contenido de humedad

Los suelos con características de cenizas volcánicas tienden a tener contenidos altos de humedad y consistencias muy blandas. Mediante ensayos de humedad natural ejecutados

sobre muestras alteradas, se obtienen humedades que varían desde 52.9% a 69.6% con valores promedio de 61.9%.

4.1.2 Gravedad específica

Las cenizas están compuestas por minerales primarios livianos y en menor proporción por minerales pesados. Por lo general, los minerales presentes incluyen feldespatos ($G_s=2.2-2.4$), cuarzo ($G_s= 2.6-2.65$), hornblenda ($G_s= 3.0-3.4$), hiperestena ($G_s=3.2 - 3.9$), augita ($G_s = 3.2 - 3.6$), magnetita ($G_s = 4.5 - 5$), biotita ($G_s = 2.9 - 3.4$), apatita ($G_s = 3.1 - 3.2$) y principalmente vidrio volcánico ($G_s = 2.2 - 2.4$). (Lizcano & Herrera, 2006).

En este caso se obtiene un rango de variación entre 2.62 y 2.69, con un valor promedio igual a 2.65, para la gravedad específica. Dicha magnitud puede indicar la presencia de cuarzo ($G_s= 2.65$) y caolinita ($G_s=2.64 \pm 0.02$), lo cual será verificado a partir de los resultados obtenidos mediante el ensayo DRX.

Este último arcillomineral mencionado se caracteriza por ser estable en presencia de agua, generalmente con una pequeña capacidad de intercambio catiónico y baja actividad.

Lo anterior es una aproximación que se realiza a partir de la magnitud de la gravedad específica para tener una idea de los minerales que probablemente tengan presencia en el suelo. Sin embargo, no deja de ser una correlación. Para mayor certeza de los minerales que hacen presencia en el suelo en estudio, se realiza el análisis de Difracción de rayos X, expuesto más adelante en este capítulo.

4.1.3 Relación de vacíos

Para la determinación de la relación de vacíos del suelo, se realizan ensayos de balanza hidrostática empleando muestras con distintos contenidos de humedad. De esta manera se determina la curva de contracción e x w , indicada en la Figura 28.

La relación de vacíos ha sido empleada por varios autores para correlacionar la resistencia del suelo a ser erosionado. Bastos (1999) divide el suelo en dos clases según su índice de vacíos: suelos fácilmente erodables con $e > 0.70$ y suelos con resistencia a la erosión para $e \leq 0.70$. Como se evidencia en la curva de contracción, la relación de vacíos del material se encuentra siempre por encima de 0.90 por lo cual según el criterio expuesto se esperaría que su erodabilidad sea alta.

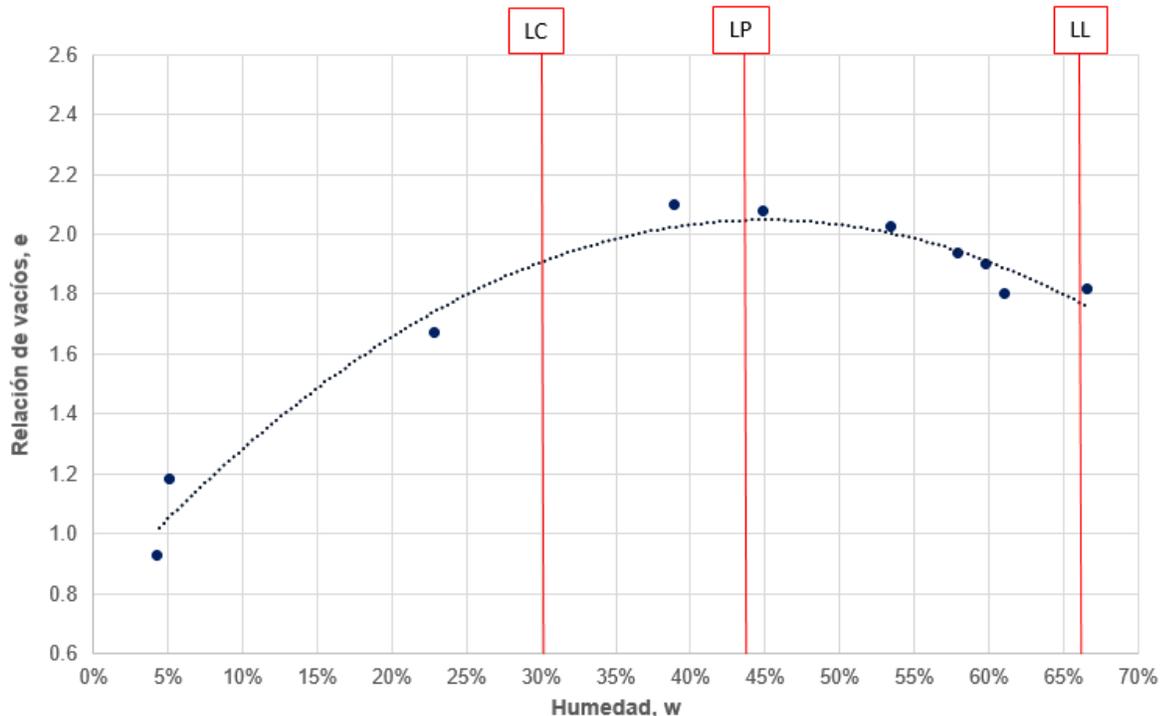


Figura 28. Humedad (w) vs Relación de vacíos (e)

Se observa que cuando el suelo tiene una humedad menor al límite plástico, al disminuir el contenido de humedad disminuye también la relación de vacíos del suelo. Mediante la curva de succión construida en capítulos posteriores es posible observar que los cambios de succión más pronunciados se dan en humedades menores al 38%, variando desde 70kPa en dicho valor hasta 1000kPa para una humedad de 23%.

Es claro que hasta el límite de contracción el suelo se encuentra saturado, para humedades por debajo del límite de contracción, cuando el suelo se encuentra floculado, el índice de vacíos disminuye; debido a que cuando se pierde la saturación, la succión va a actuar en el nivel de los agregados, pudiendo contraer el suelo. Esto quiere decir que la disminución de la humedad conlleva a un aumento significativo de la succión, generada por una mayor contracción de los agregados del suelo disminuyendo así su relación de vacíos.

Por otro lado, la gráfica obtenida indica que para las humedades que se ubican por encima del límite plástico, al aumentar el contenido de agua en el suelo, la relación de vacíos disminuye, variando en un rango pequeño, entre 1.8 y 2.1.

4.1.4 Límites de consistencia (clasificación según USCS)

Se identificó que, para las tres muestras analizadas los índices de plasticidad (IP) varían desde el 20 al 26%. Según Bastos (1999), las muestras con IP menor o igual al 5% se relacionan como suelos potencialmente erodables y con IP mayor o igual al 10% como suelos de baja erodabilidad. Para este caso y, teniendo en cuenta el criterio del autor ya mencionado, el suelo se relaciona con baja erodabilidad.

Por otra parte, Santos (2001) clasifica los suelos con un IP mayor al 15% como suelos con buena resistencia a la erosión, mientras los suelos con un IP menor que el 6% como suelos con baja resistencia a la erosión. Para el caso particular, el suelo clasifica con buena resistencia a la erosión.

Gray y Leiser (1982), determinan la erodabilidad de cada grupo de suelo en orden decreciente tal como se muestra a continuación:

$$ML > SM > SC > MH > OL > CL > CH > GM > SW > GP > GW$$

Con base en el criterio de Gray y Leiser (1982) y la clasificación obtenida para el suelo, igual a MH en todos los casos, se puede afirmar que se espera una erodabilidad media a alta del material.

Si bien los altos valores de IP debidos posiblemente a la presencia de ciertos arcillominerales como se verá en los resultados de DRX, clasifican el suelo como resistente a la erosión, el arreglo estructural de las cenizas ante cambios de humedad puede influenciar sustancialmente la erodabilidad del suelo.

Las diferencias en magnitudes que se aprecian entre los límites realizados con muestra bajo su humedad natural y secada al aire se deben a que, en esta última, el secado al aire genera una deshidratación de las agregaciones, para luego volverles a adicionar agua. En ese proceso el aire entre agregaciones queda aprisionado, lo que no permite la entrada de agua a la muestra de suelo, resultando los límites con muestras secas al aire, menores a los ejecutados mediante humedad natural. Este hecho resalta además la importancia de la preparación de las muestras para los ensayos de límites de Atterberg.

4.1.5 Ensayo de granulometría

Se realizó el análisis granulométrico de tres muestras de suelo, incluyendo el ensayo de hidrómetro para complementar la curva con las fracciones finas con diámetros menores a 0.074mm. Para cada muestra se realiza el análisis con y sin defloculante. La comparación de las curvas granulométricas obtenidas en cada ensayo se indica en la Figura 29.

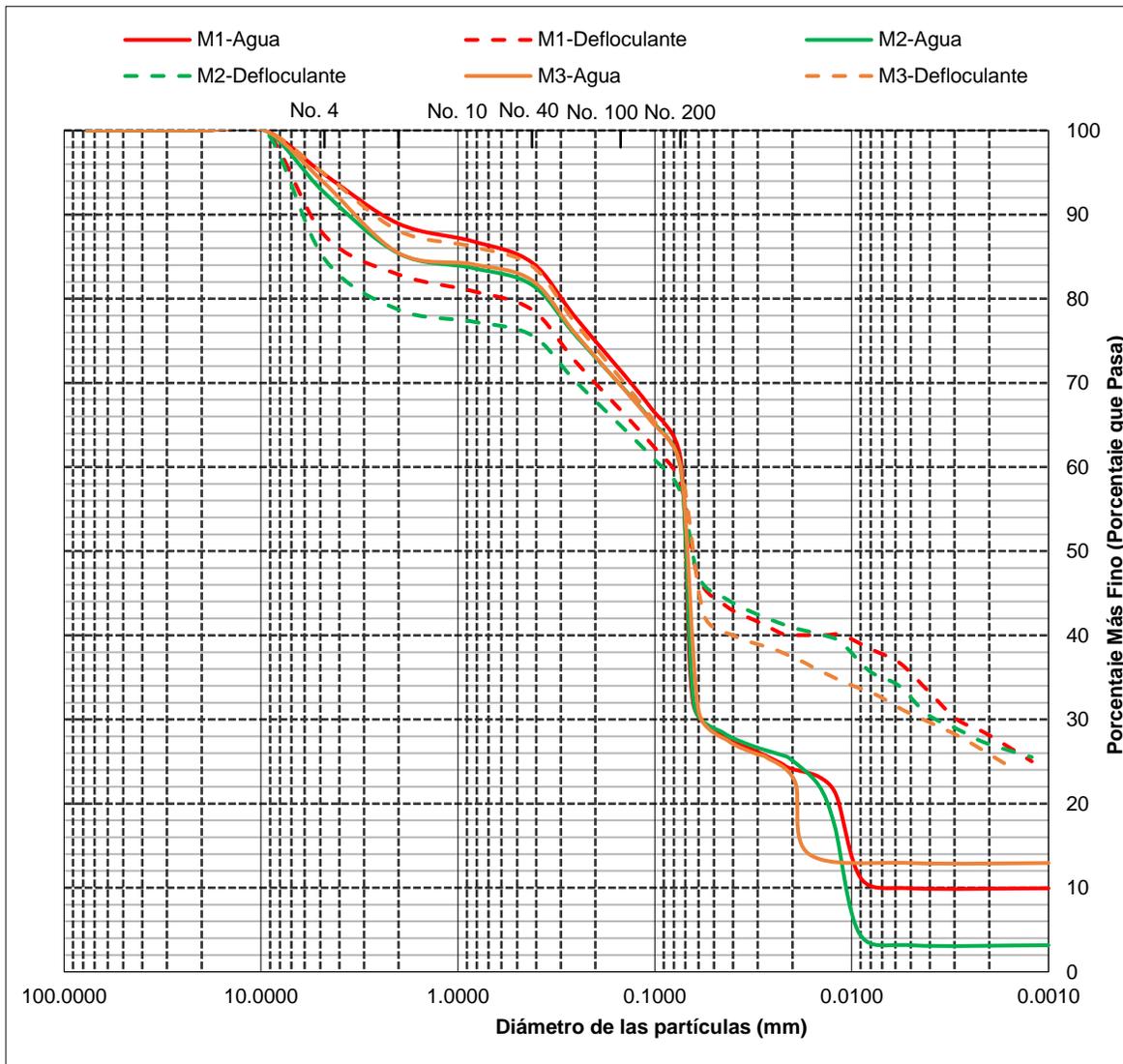


Figura 29. Curvas granulométricas con y sin defloculante

Con base en la figura anterior es posible identificar una diferencia marcada entre el porcentaje de partículas finas reportado en las curvas sin defloculante y las curvas donde

se empleó defloculante. El desnivel que se presenta en la Figura 29 al pasar del tamizado a la fase de hidrómetro, ocurre debido a que en el proceso de tamizado se destruyen las agregaciones del suelo, reportándose un porcentaje de finos mayor en comparación del indicado en el hidrómetro.

Por otro lado, el desnivel que se observa entre 0.01mm y 0.02mm en el caso de los hidrómetros ejecutados con agua, indican que dichas agregaciones permanecen estables en presencia de agua. Se observa que esa estabilidad se pierde en presencia de defloculante. Los desplazamientos que se indican en las curvas con defloculante están ligados a los intercambios iónicos que ocurren con su adición.

Se identificó el tamaño de partícula D_{50} , el cual indica que el 50% de las partículas de suelo tienen un diámetro menor a ese valor. Según las curvas granulométricas obtenidas, el D_{50} tuvo una variación entre 0.06mm y 0.07mm (Ver Figura 29). En la investigación realizada por Hénensal (1987) se determinó que los suelos con máxima erodabilidad presentaban diámetros medios entre 0.06mm y 0.12mm. Para este caso particular y, bajo el criterio del autor ya mencionado, las muestras analizadas de suelo tienen un D_{50} próximo al límite inferior establecido, por lo cual no se espera una erodabilidad máxima.

Adicionalmente, se identificó que, para las tres muestras analizadas con defloculante, entre el 60% al 64% del suelo pasó por el tamiz No. 200 (ver Figura 29). Según Bastos (1999), los suelos en los que pasa menos del 35% por el tamiz No. 200, se clasifican como de media a alta erodabilidad, mientras que los suelos en los que pasa entre el 35% y 55% por el tamiz No. 200, se clasifican como de media erodabilidad. Para este caso en particular, el porcentaje es superior a lo definido por Bastos, por lo que se descarta que el suelo sea de media o de alta erodabilidad.

Por otra parte, según el criterio DNER (1979), los suelos que presenten un porcentaje que pase el tamiz No. 40 entre el 49% y el 96% se clasifican como suelos con buena resistencia a la erosión. Para este caso, las muestras analizadas indican que entre el 75% y 85% del suelo pasa la malla 40, por lo tanto, cumplen con la condición definida por el DNER, lo que se traduce en que el suelo presenta una baja erodabilidad.

Santos (2001) relaciona el índice de plasticidad y el coeficiente de uniformidad C_u con la erodabilidad del suelo, empleando lo indicado en la Tabla 13. Para este caso, las muestras M1 y M2 sin defloculante permiten conocer la magnitud de D_{10} y D_{60} , lo que resulta en valores de C_u iguales a 8.10 y 6.10 respectivamente. Según el criterio expuesto, se considera que el suelo puede presentar erodabilidad media.

Tabla 13. Criterios adoptados por Santos (2001) para relacionar el índice de plasticidad (IP) y el coeficiente de uniformidad (Cu)

IP	Erodabilidad	Cu	Erodabilidad
IP > 15	Baja resistencia a la erosión	Cu > 15	Baja
$6 \leq IP \leq 15$	Media resistencia a la erosión	$5 \leq Cu \leq 15$	Media
IP < 6	Baja resistencia a la erosión	Cu < 5	Alta

Nota: Reproducción de “Análisis de procesos erosivos superficiales en el área de Mina de Alegria Norte y Sur” por Ribeiro, 2016.

A continuación, se estiman los valores de A y B con el fin de conocer el porcentaje de dispersión del suelo obtenido según lo indicado en las curvas de granulometría por hidrómetro con y sin defloculante. Head (1994) indica que la determinación de los valores de A y B debe realizarse en el diámetro correspondiente a las arcillas, es decir 0.002mm. Siguiendo este criterio, los valores se resumen en la Tabla 14.

Tabla 14. Porcentaje de dispersión – Criterio Araujo (2000)

Muestra	A	B	Porcentaje de dispersión	Interpretación	Erodabilidad
M1	0.10	0.28	36%	Medianamente dispersivo	Alta
M2	0.03	0.27	11%	No dispersivo	Media a baja
M3	0.13	0.26	50%	Medianamente dispersivo	Alta

La propuesta presentada por el autor (Araujo, 2000) para la validación de la erodabilidad del suelo en función del porcentaje de dispersión, es la siguiente:

- 20% < Porcentaje de dispersión < 25%: Erodabilidad media
- 25% < Porcentaje de dispersión < 50%: Erodabilidad alta
- 50% < Porcentaje de dispersión: Erodabilidad muy alta

Bastos (1999) presenta también un criterio para la validación de la erodabilidad con base en la relación de dispersión establecida por Middleton en 1930. Este criterio parte de las partículas con diámetro menor a 0.005mm, teniendo en cuenta fracciones limosas y arcillosas. Al calcularse la magnitud de RD dada por la Ecuación (4.1), el criterio indica que los suelos con un RD superior al 15% son erodables.

$$RD (\%) = \frac{\% < 0.05mm \text{ sin defloculante}}{\% < 0.05mm \text{ con defloculante}} * 100 \quad (4.1)$$

Tabla 15. Validación de erodabilidad con base en la magnitud de RD (%) – Criterio Bastos (1999)

Muestra	Sin defloculante	Con defloculante	RD	Erodabilidad
M1	0.10	0.36	28%	Erodable
M2	0.03	0.33	9%	Erodabilidad baja
M3	0.13	0.30	43%	Erodable

Se observa que los resultados obtenidos mediante el criterio de Araujo (2000) indican erodabilidades media y altas. De manera congruente, el criterio empleado por Bastos (1999) presenta probabilidad de que el suelo sea erodable.

De igual manera se resalta que las curvas de hidrómetros obtenidas cuentan con tramos horizontales lo que indica que es posible que el hidrómetro no pudiera medir pequeñas diferencias en la cantidad de suelo suspendido, lo que finalmente afecta la lectura de los porcentajes empleados en los criterios anteriores.

Finalmente se estima el tenor de agregación del suelo superficial empleando la Ecuación (3.3).

Tabla 16. Tenor de agregación del suelo

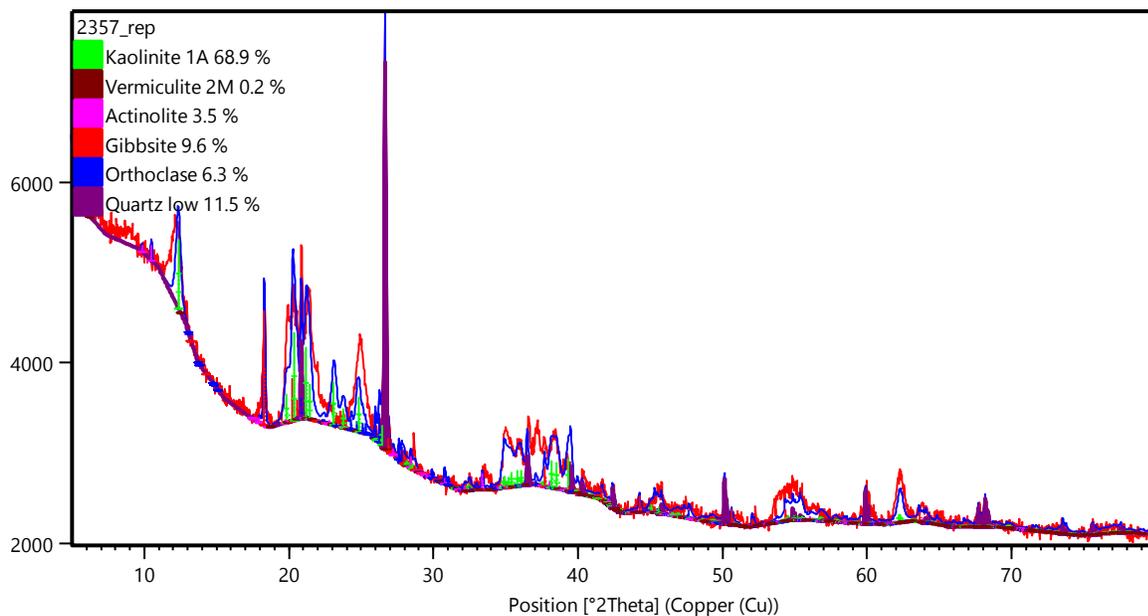
Muestra	A	B	TA
M1	0.29	0.45	64%
M2	0.27	0.42	89%
M3	0.23	0.47	50%

Los porcentajes de tenor de agregación obtenidos indican un suelo con agregación media a alta. A partir del porcentaje de dispersión obtenido en la Tabla 14, se indica que éste varía entre el 11% y el 50% lo que indica que la estructura del material puede considerarse como floculante.

4.2 Caracterización mineralógica y estructural

4.2.1 Difracción de Rayos X

El ensayo de difracción de rayos X tiene como objetivo determinar los minerales presentes en las muestras de suelo extraídas de campo, lo que permite clarificar el comportamiento estructural y mineralógico del material. En la Figura 30 se presenta el difractograma obtenido para la muestra del suelo en estudio.



Código	Nombre	Fórmula química
98-008-0082	Kaolinite 1A	$H_4Al_2O_3Si_2$
98-002-7644	Vermiculite "M"	$H_2Mg_3O_{12}Si_4$
98-008-6585	Actinolite	$H_{1.565}Al_{0.255}Ca_{1.904}F_{0.365}Fe_{0.891}K_{0.048}Mg_{4.083}Mn_{0.02}Na_{0.14}O_{23.635}Si_{7.785}Ti_{0.014}$
98-024-5301	Gibbsite	H_3AlO_3
98-015-9347	Orthoclase	$AlK_3O_8Si_3$
98-001-6331	Quartz low	SiO_2

Figura 30. Difractograma de la muestra de suelo

El difractograma obtenido indica la presencia principalmente de los siguientes minerales: caolinita (68.9%), cuarzo (11.5%) y gibsita (9.6%). El resto de los minerales se presentan en menores proporciones.

Según Cataño & Tobón (2005) tanto el grupo superior como el intermedio de cenizas volcánicas presentes en el Oriente Antioqueño contienen en su fracción fina los minerales de vermiculita, montmorillonita e illita para el primero y montmorillonita, magnesiohornblenda y gibsita para el segundo. Siendo así, la presencia de minerales como vermiculita y gibsita concuerda con lo descrito por los autores, aunque para este caso se encuentran en menores proporciones.

La presencia de vermiculita en bajas proporciones indica una baja probabilidad de expansión y contracción del suelo, ya que, aunque existen variaciones en el espaciamiento interplanar basal de este arcillomineral, su proporción no logra condicionar un comportamiento expansivo del suelo. Por otro lado, la caolinita es considerado un mineral estable en el que no se dan variaciones significativas de su espaciamiento interplanar basal; por lo cual, al estar en una proporción mayor indica una baja probabilidad de expansión del suelo.

Con relación a la estructura del material recolectado en campo, este tiene una textura limoarcillosa, presenta un color pardo en estado húmedo y es posible apreciar una alta porosidad en su estructura (Ver Figura 31). En estado seco la ceniza adopta una textura suelta y un color amarilloso, en la Figura 32 se observan agregaciones formadas por grumos de material de forma redondeada y grietas que indican una mayor permeabilidad del material bajo condiciones secas. Es importante mencionar que al contar el material en estado seco con una mayor permeabilidad favorece a la infiltración del agua lluvia y tarda más en formarse la escorrentía que desataría un proceso erosivo.

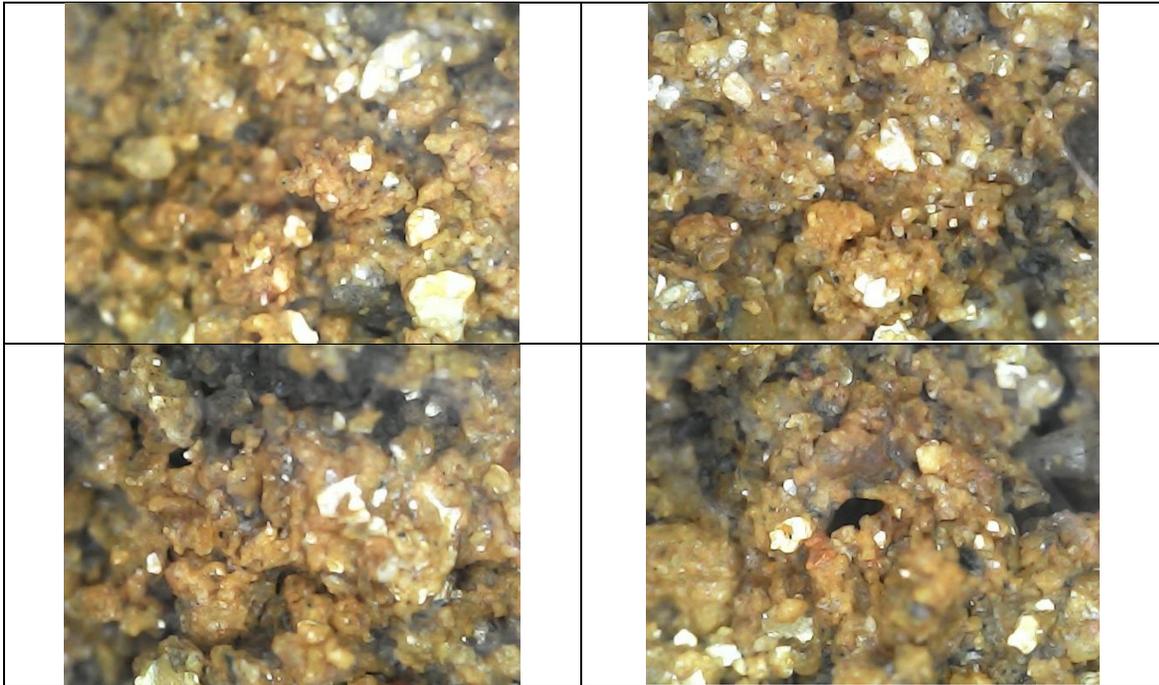


Figura 31. Ceniza volcánica - Estado húmedo

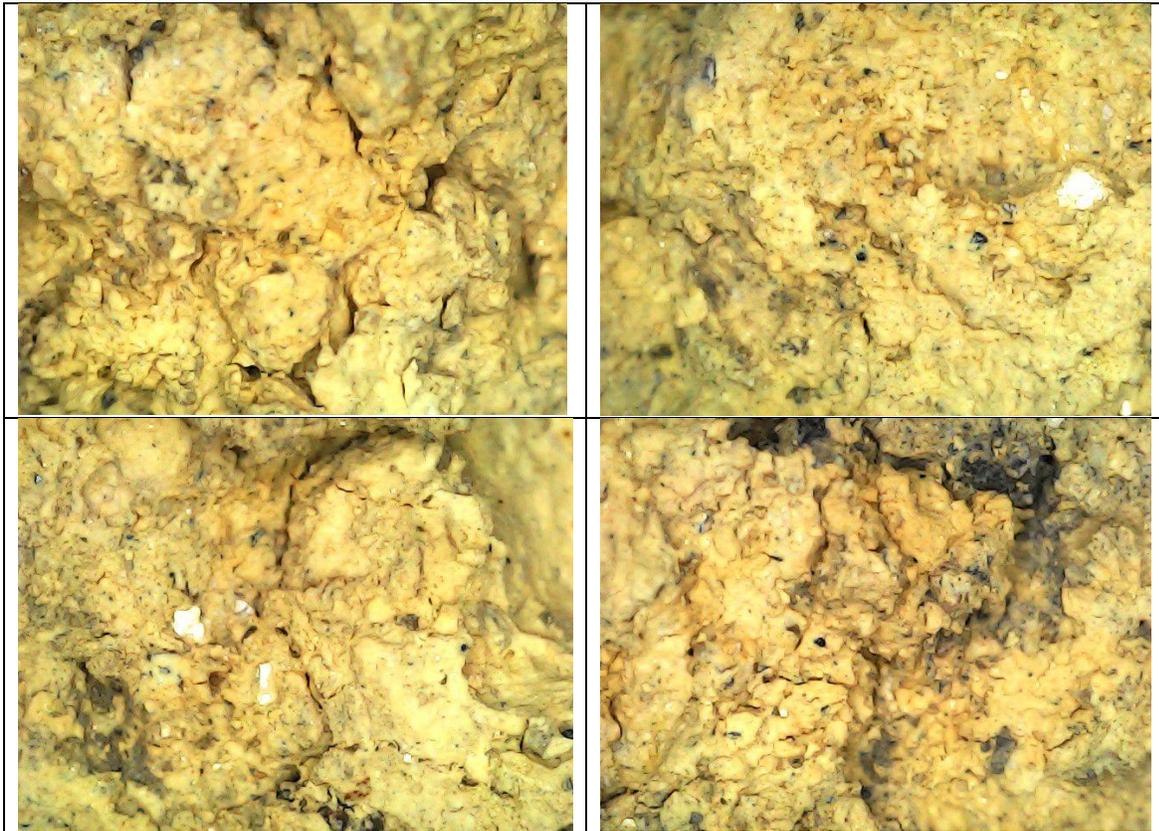


Figura 32. Ceniza volcánica - Estado seco

Para el caso de la muestra húmeda (Figura 31) se observan floculaciones o agregaciones con baja estabilidad. En la Figura 32, desaparecen los poros interfloculaciones/interagregaciones indicados en la Figura 31, apuntando a una pequeña estabilidad estructural.

4.2.2 Potencial de hidrógeno - pH

El potencial de hidrógeno se realizó con base en la norma ASTM – D4972. La condición de pH de los suelos estudiados es próxima al estado neutro. Dicho valor se halla como parámetro de evaluación del perfil de meteorización, a partir de la medición del pH en soluciones de KCl y H₂O destilada, cuya diferencia (ΔpH) indica el predominio de oxihidróxidos de Fe y Al o arcillominerales en el suelo, además de conocer la naturaleza alcalina o ácida del suelo.

Finalmente se establece el punto de carga cero (PZC), dado por la expresión:

$$PZC = 2pH_{KCL} - pH_{H2O} \quad (4.2)$$

Las medidas de dichos parámetros se indican en la Tabla 17:

Tabla 17. Mediciones de pH del suelo

Muestra	Solvente Agua		Solvente KCL		ΔpH	PZC
	Temp [°C]	pH	Temp [°c]	pH		
M1	25.4	5.94	25.4	4.12	-1.8	2.3
M2	25.4	6.04	25.4	4.11	-1.9	2.2
M3	25.4	5.98	25.4	4.11	-1.9	2.2

En todas las mediciones registradas se observa un valor de $\Delta\text{pH} < 0$ lo cual indicaría el predominio de arcillominerales, lo que coincide con la presencia abundante de caolinita, reportada en el ensayo DRX. De igual modo, de acuerdo con los valores del PZC obtenidos, las partículas tienden a dispersar en medios más alcalinos que dicho punto de carga cero. Dicha dispersión, coincide con la dispersión registrada en el ensayo de granulometría, que le confiere característica de erodable según Araujo (2000).

4.2.3 Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva

Los resultados obtenidos mediante el ensayo de capacidad de intercambio catiónico efectivo indican una mayor presencia de calcio en la muestra de suelo. Los análisis indican una CICE igual a 3.20. Los valores típicos conocidos de CICE para la caolinita como mineral con mayor presencia en el suelo, varían entre 3 y 15 cmol/kg. Siendo así, el valor obtenido confirma la presencia y predominancia de dicho mineral identificado mediante el ensayo DRX.

Tabla 18. Resultados análisis de intercambio catiónico

Muestra	cmol(+)/kg					mg/kg	M.O
	Al	Ca	Mg	K	CICE	P	%
1	0.5	2.52	0.12	0.06	3.20	1.29	1.20

4.3 Caracterización hidro/mecánica

4.3.1 Permeabilidad

A partir de los ensayos de cabeza variable ejecutados sobre el material, se obtienen las siguientes permeabilidades saturadas:

Tabla 19. Resultados de permeabilidad saturada

Prueba	kmin (m/s)	kmax (m/s)	kprom (m/s)
1	6.5×10^{-6}	7.5×10^{-6}	6.9×10^{-6}
2	7.3×10^{-6}	8.9×10^{-6}	8.0×10^{-6}
		prom=	7.45×10^{-6}

Como se observa, la permeabilidad del material es del orden de 10^{-6} m/s lo que según la Tabla 20 indicaría un suelo cuya permeabilidad se encuentra entre los valores típicos para arenas finas y arenas arcillosas. Es importante mencionar que la magnitud de esta permeabilidad estará influenciada por la presencia de floculaciones/agregaciones en el suelo como se muestra en la Figura 31.

Tabla 20. Valores típicos del coeficiente de permeabilidad (PINTO,2006)

Tipo de suelo	Valores típicos de k
Arcillas	$< 10^{-9}$ m/s
Limos	10^{-9} m/s a 10^{-6} m/s
Arenas arcillosas	10^{-7} m/s
Arenas finas	10^{-5} m/s
Arenas medias	10^{-4} m/s
Arenas gruesas	10^{-3} m/s

Nota= Reproducción de "Análisis de procesos erosivos superficiales por medio del Ensayo Inderbitzen", por Stephan, 2010, Universidad Federal de Vicosa.

Según Mendes (2006), la estructura de los suelos arcillosos tienen una influencia significativa en la resistencia a la erosión debido a que sus propiedades físicas y químicas hacen que las agregaciones permanezcan estables en presencia de agua y de materia orgánica humificada. Cuanto mayor estabilidad tengan las agregaciones, mayor es la permeabilidad del suelo y en consecuencia, menor la escorrentía superficial lo que conlleva a un menor arrastre de partículas debido a la acción del agua. Con base en la magnitud de permeabilidad obtenida, se esperaría que la erodabilidad del suelo en estudio resulte siendo de media a alta.

4.3.2 Curva característica de succión

Tal como se indicó en la metodología, se realiza el ensayo de succión para el suelo con diferentes contenidos de humedad, con el objetivo de construir la curva característica de retención de agua del suelo, las cuales representan la variación de la succión vs contenido de humedad en kPa y en pF, respectivamente (Figura 33 y Figura 34) y vs saturación (Figura 35).

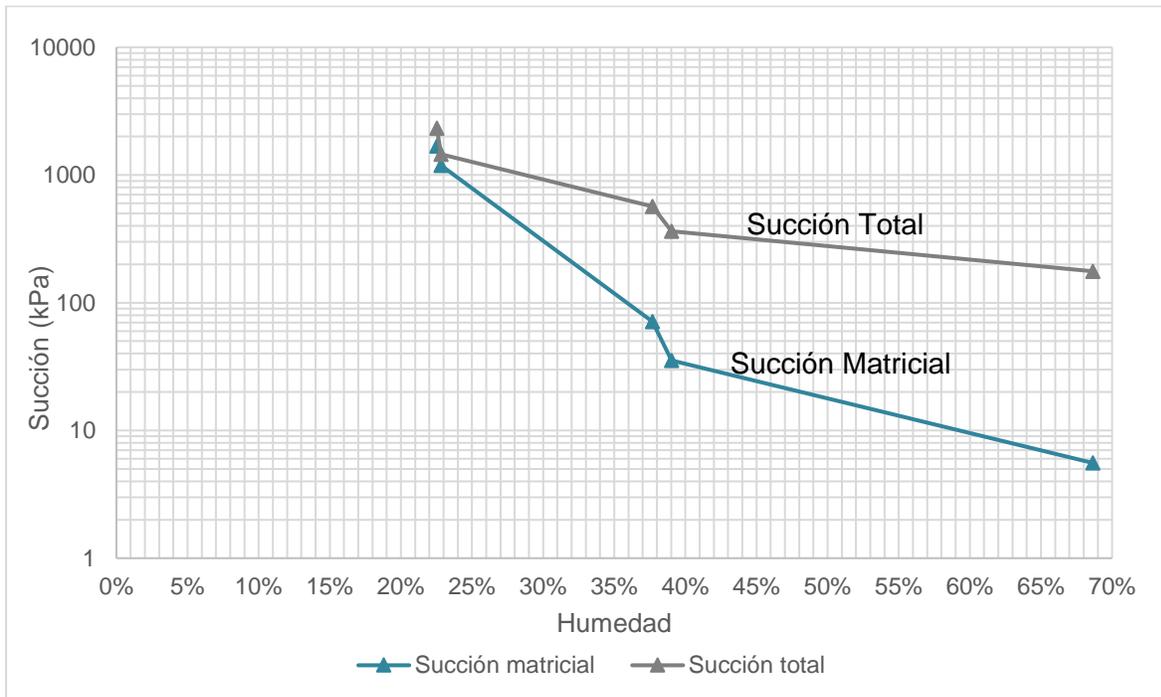


Figura 33. Curva característica de retención de agua (Succión total y matricial) en kPa

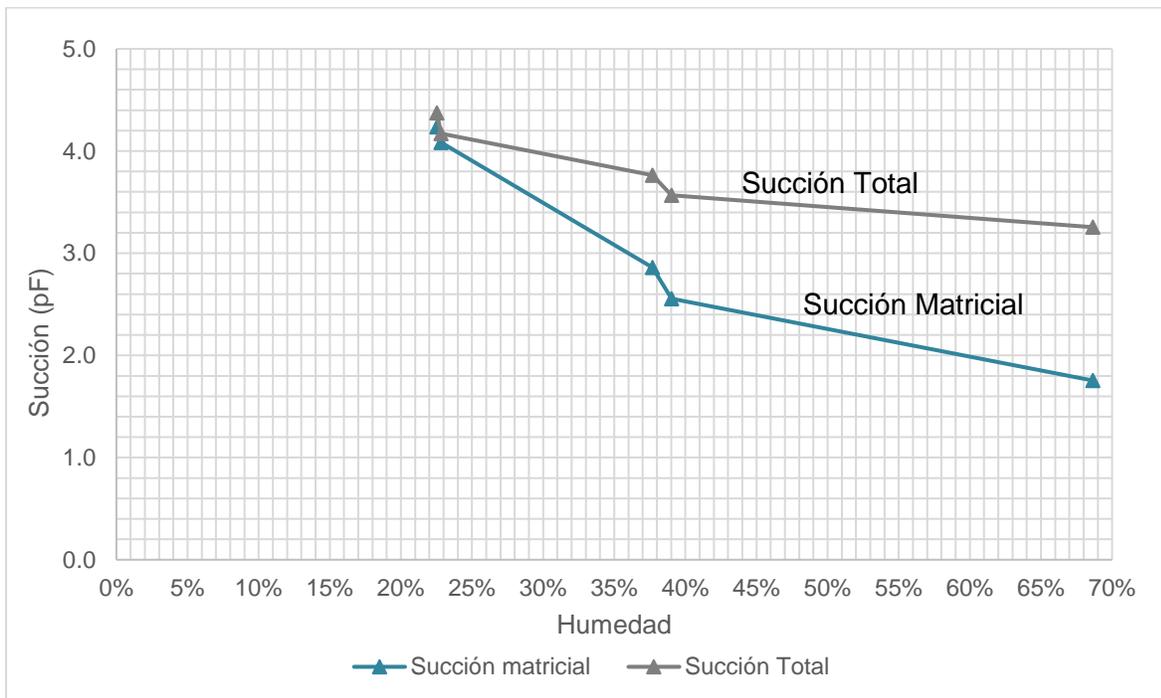


Figura 34. Curva característica de retención de agua (Succión total y matricial) en pF

De acuerdo con la Figura 33, es posible evidenciar al ser diferente la succión total y la matricial, que para valores de humedad por encima del 25% existe un efecto de la succión osmótica en los poros del suelo por efecto químico del líquido circundante.

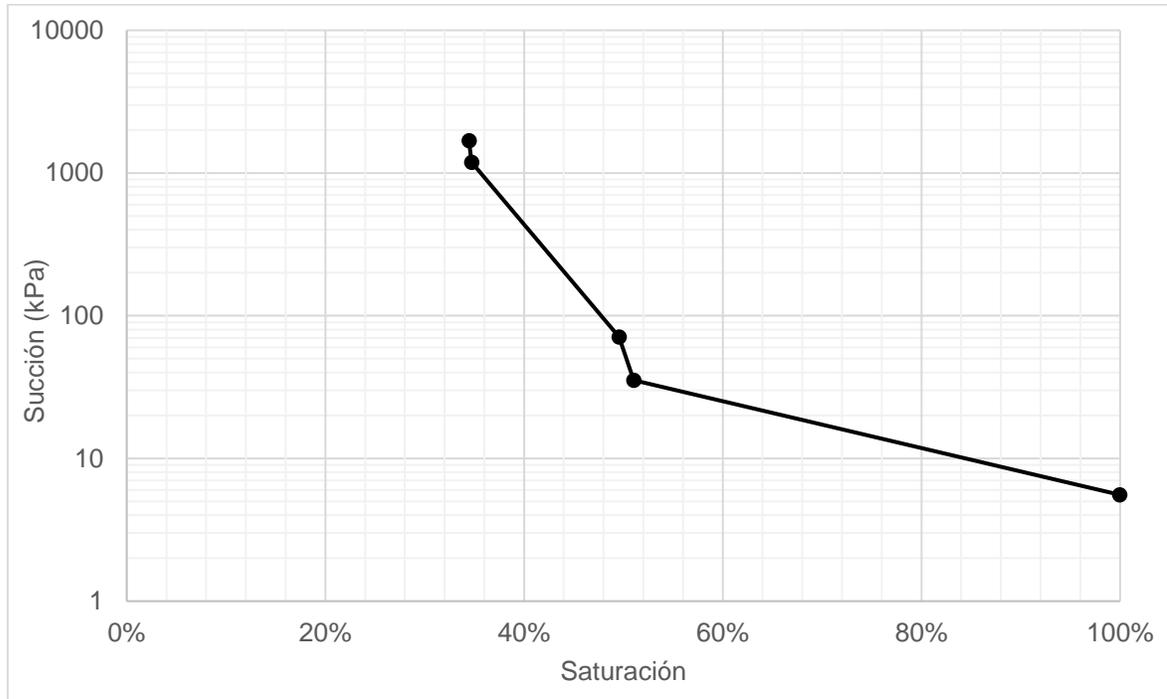


Figura 35. Curva característica de retención de agua (Succión matricial vs grado de saturación)

Por otra parte, se observa en la Figura 35 los valores de succión matricial con relación a su saturación, la cual permite analizar los resultados de manera más específica con el tipo de partícula y el arreglo estructural del suelo. En ella, se obtiene una curva de succión unimodal, dando indicios de una variación homogénea del tamaño de los poros del suelo, y de una meteorización poco severa. Adicionalmente, para valores altos de saturación (por encima del 45% aproximadamente) es posible observar como las variaciones de succión son más pequeñas, y para valores por debajo del 45% de saturación, se presenta un quiebre donde termina la entrada del aire a los macroporos, presentándose variaciones considerables de la succión ante pequeñas variaciones de saturación.

Este comportamiento es un reflejo de una estructura floculada del suelo, la cual ha sido evidenciada desde la caracterización del material.

Análisis del efecto de la succión en la erodabilidad según Ensayo Inderbitzen

Con el objetivo de observar la influencia de la succión en la pérdida de suelo durante el ensayo Inderbitzen, se grafican los resultados para las condiciones de las muestras seleccionadas en la Tabla 21. Como se puede observar, ambas muestras de suelo fueron sometidas al mismo caudal y a una pendiente similar (45° y 50°), por lo cual será posible apreciar la influencia de la succión en la pérdida de suelo.

La Figura 36 expone que entre mayor sea la succión del suelo, menor es la pérdida de suelo por erosión superficial. Autores como Almeida (2013) afirman que las muestras con valores más altos de succiones iniciales fueron más resistentes a la erosión superficial y dicha resistencia iba disminuyendo conforme la muestra se iba saturando.

Araujo (2000) afirma que la succión es una característica del suelo de gran relevancia en la erodabilidad, siendo inversamente proporcional, es decir, a mayor succión, menor susceptibilidad del suelo a la erosión.

Por otro lado, Lima (1999) también indica que, a mayor contenido de humedad de la muestra, menor será la cantidad de agua que absorbe. Finalmente, la saturación del suelo permite que ocurra una mayor escorrentía superficial de agua, lo que conduce a una mayor fuerza de corte que ejerce el líquido sobre la superficie del suelo, y por lo tanto ejerce una fuerza erosiva mayor.

Tabla 21. Ensayos Inderbitzen empleados en el análisis de succión

Ensayo	Condiciones				Succión (kPa)	Pérdida de suelo (gr)
	Q (cm ³ /s)	Pend (°)	w (%)	S (%)		
Inderbitzen - M1 caudal cte	65	45°	61	85	10	86.71
Inderbitzen - M1 pendiente cte	65	50°	66	98	6	132.45

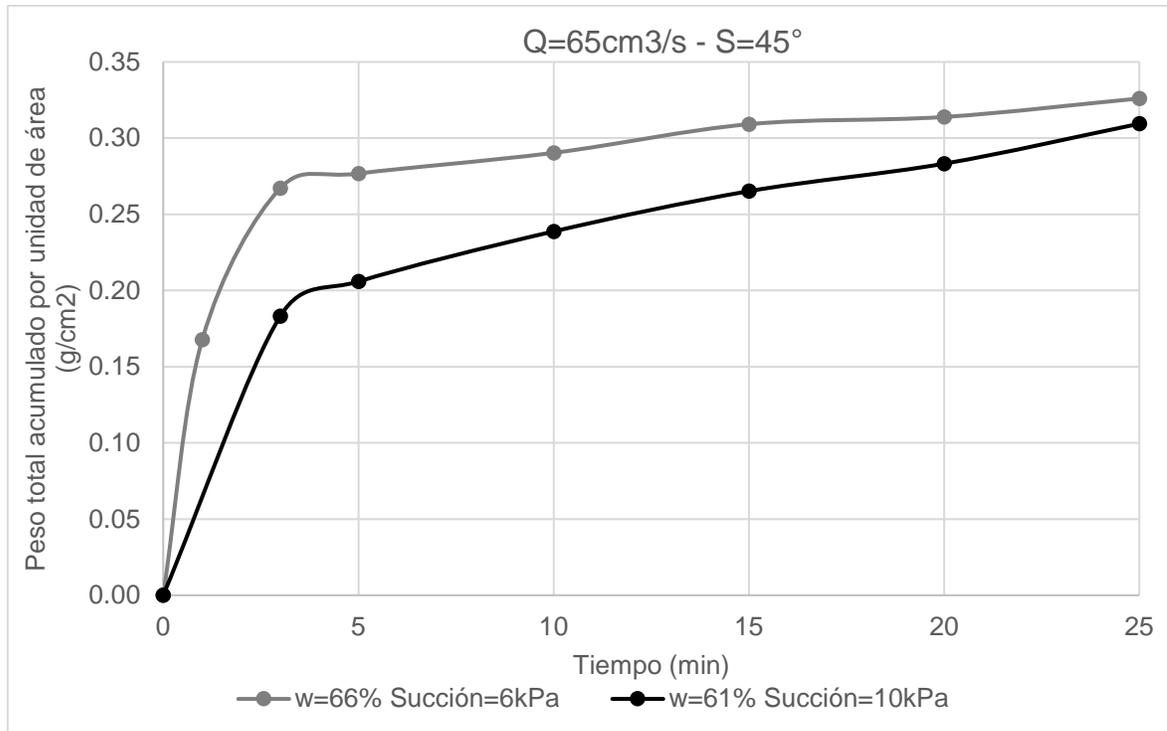


Figura 36. Pérdida de suelo acumulada en el tiempo para distintas succiones matriciales

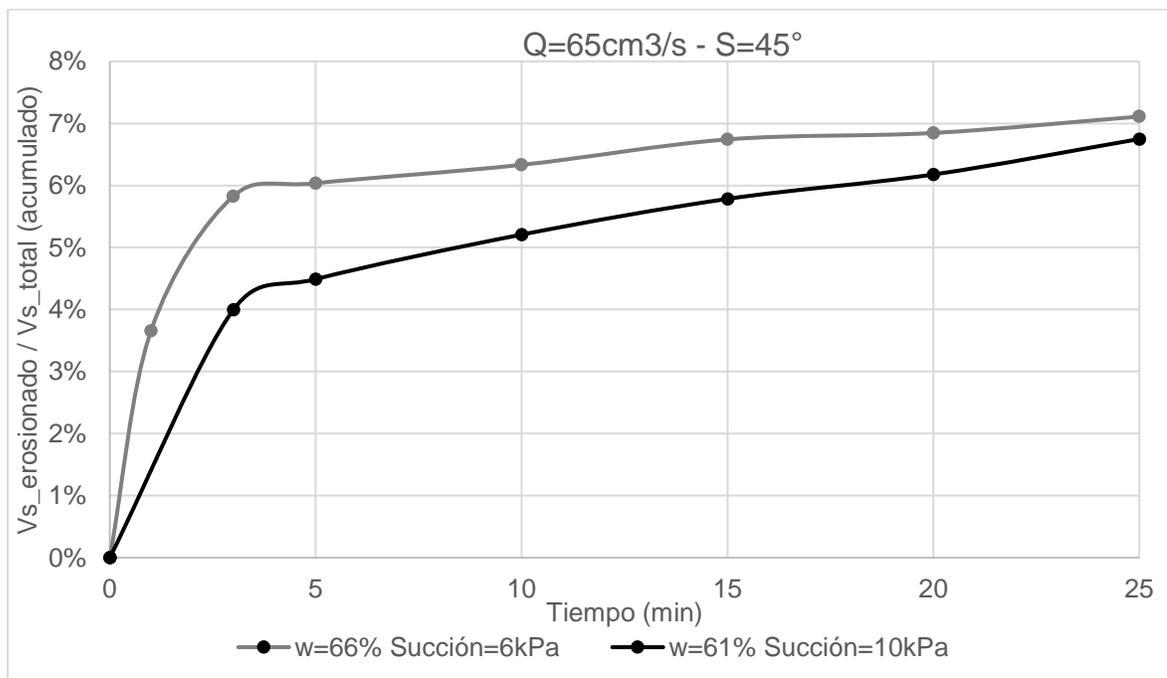


Figura 37. Proporción de volumen de sólidos erosionado/ Volumen de sólidos total en el tiempo para distintas succiones matriciales

Según lo anterior es posible observar que la muestra con mayor humedad (M1-pendiente constante $w=66\%$) se satura más rápido, lo que implica que la fuerza erosiva del agua sea mayor, generando mayores pérdidas de suelo acumulada por unidad de área.

Sin embargo, al tratarse de un material cuyas propiedades coinciden con una ceniza volcánica, su comportamiento podrá variar dependiendo del grado de saturación del material. En el caso de las muestras analizadas, ambas contaban con humedades mayores al 50%. Sin embargo, para humedades más bajas o incluso condiciones donde el material se encuentre seco, la pérdida de suelo podría ser mayor en consecuencia del cambio textural del material a esa humedad. Por lo anterior, este comportamiento de pérdida de suelo en función de la succión no podría generalizarse para todas las condiciones de humedad debido al origen y formación del material en cuestión y la forma de la curva característica lo confirma.

Las dos muestras que se emplearon para este análisis tienen humedades que se ubican en la zona de menor pendiente de la curva característica (Ver Figura 33). Esto implica que la magnitud de la succión para estas dos muestras presenta una variación pequeña al pasar de una a otra. Teniendo en cuenta esto se genera una curva de peso total acumulado por unidad de área en función del tiempo, multiplicando el eje Y por el valor de la succión en pF, pensando en tener los dos materiales bajo las mismas condiciones en cuanto a efecto de la succión. Siguiendo este procedimiento se obtiene la Figura 38. Al comparar esta gráfica con la presentada anteriormente en la Figura 36, es posible determinar que ambas curvas conservan su forma y proporción, lo que indica que al tratarse de humedades que implican variaciones pequeñas de succión, su influencia no es determinante en la pérdida de suelo; se esperaría que, para valores de succión ubicados en la parte más inclinada de la curva, dicha influencia se vea más marcada.

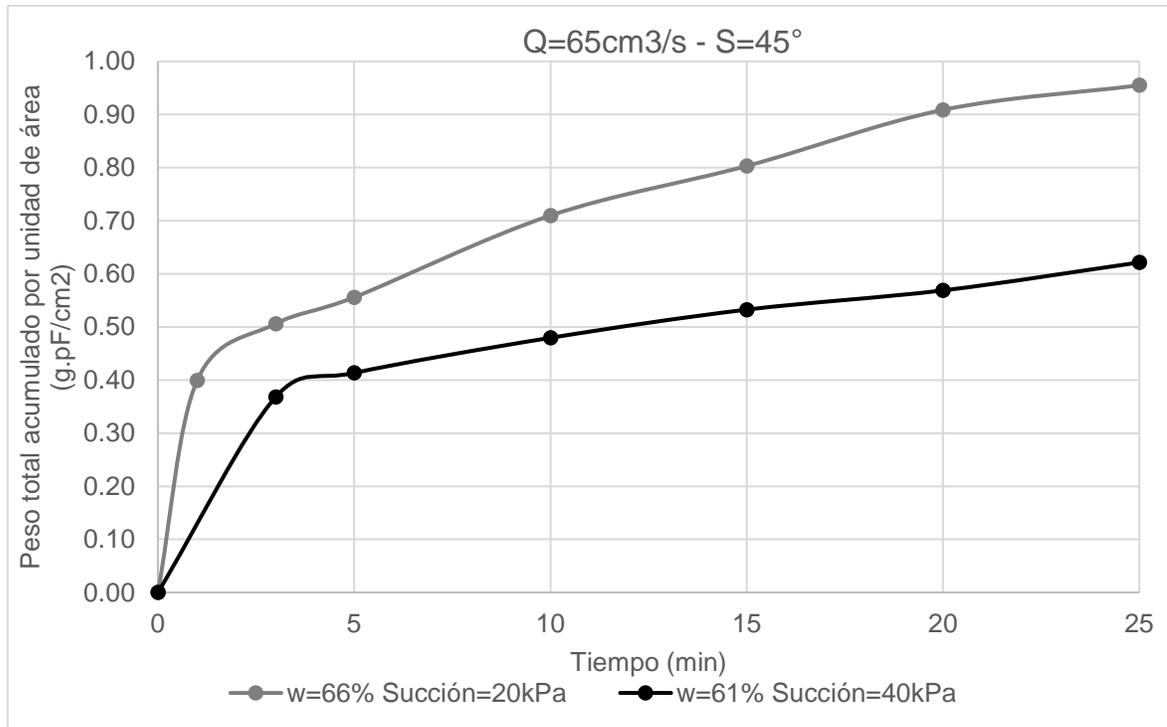


Figura 38. Pérdida de suelo acumulada (g.pF/cm²) en el tiempo

4.3.3 *Crumb test*

Con base en el registro fotográfico de las cuatro muestras sometidas al ensayo (Ver desde la Tabla 23 hasta la Tabla 26), se observa en todas ellas fracturas y fragmentos que se desmoronan con el tiempo. Las muestras M2 y M3 son las que presentan de manera más marcada dicho desmoronamiento. Sin embargo, en ninguno de los casos se pudo apreciar un cambio de turbidez en el agua que indicara la dispersión del suelo. No se observaron variaciones significativas en las muestras a lo largo del tiempo de la prueba. Por lo tanto, se clasifica el suelo como grado 1 – No Dispersivo. Tales resultados apuntan a la improbable presencia o a la presencia en una pequeña proporción de minerales arcillosos expansivos, lo cual se confirmará más adelante en el ensayo de difracción de rayos X. Los resultados se resumen en la Tabla 22.

Tabla 22. Crumb test - Datos y resultados

Ensayo	1	2	3	4
Muestra	M1	M2	M3	M4
Condición inicial de la muestra	Deformada, humedad natural	Deformada, humedad natural	Deformada, humedad natural	Deformada, humedad natural
Condición inicial de los terrones	Humedad Natural	Humedad Natural	Humedad Natural	Humedad Natural
Solución	Agua destilada	Agua destilada	Agua destilada	Agua destilada
Resultados	Grado 1 - No dispersivo	Grado 1 - No dispersivo	Grado 1 - No dispersivo	Grado 1 - No dispersivo
Observaciones	Se comienza a desmoronar a partir de los 30min sumergida. Se desprenden pequeños fragmentos de la muestra y presenta una grieta en el costado derecho. La muestra permanece visualmente similar desde los 30min hasta las 24hr. El agua no presenta cambios en su turbidez.	Se comienza a desmoronar a partir de los 20min sumergida. Se desprenden pequeños fragmentos de la muestra. Presenta agrietamiento en varias direcciones, en toda el área del espécimen. La muestra permanece visualmente similar desde los 30min hasta las 24hr. El agua no presenta cambios en su turbidez.	Se comienza a desmoronar a partir de los 10min sumergida. Es la muestra donde más fragmentos se desprenden. Presenta agrietamiento en varias direcciones, en toda el área del espécimen. La muestra permanece visualmente similar desde los 20min hasta las 24hr. El agua no presenta cambios en su turbidez.	Se comienza a desmoronar a partir de los 20min sumergida. Es la muestra donde menos fragmentos se desprenden. Presenta dos grietas marcadas en la parte superior del espécimen. La muestra permanece visualmente similar desde los 30min hasta las 24hr. El agua no presenta cambios en su turbidez.

Como se menciona, las cuatro muestras presentaron algún grado de fracturamiento. Este fenómeno se atribuye principalmente al proceso de expansión osmótica. Se podría deducir entonces que la cantidad de iones que están presentes en la fase sólida del suelo es mayor que la contenida en la solución ambiente; en consecuencia, el agua tiende a moverse hacia adentro del suelo a fin de reducir esta concentración, causando entonces el proceso de expansión y, en consecuencia, el fracturamiento de la muestra de suelo (Chamecki, 2002). Este comportamiento también permite inferir un desempeño de succiones bajas ante una saturación alta del suelo, por lo que no se esperan presiones significativas en la fase aire eventualmente presente en el suelo.

Este método debe complementarse con otros ensayos que se realizaron durante la investigación, sin embargo, permite observar de forma preliminar que el suelo es poco susceptible a los procesos erosivos internos, los cuales están relacionados con la dispersión o poca dispersión de la muestra.

Trabajos como el realizado por (de Araújo et al., 2007) en suelos erosivos de Goiania han presentado que la erodabilidad del suelo estimada mediante el ensayo Inderbitzen está relacionada con la dispersibilidad de la muestra obtenida mediante el *Crumb test*. En el caso de su investigación, las muestras que más se desagregaron fueron las más erosionables. Siendo así, debido al grado de dispersión obtenido según *Crumb test* para el suelo en estudio, se espera que su erodabilidad sea baja. Sin embargo, la forma en que la muestra se fractura muestra lo que puede sucederle al material en contacto con el agua.

Tabla 23. Muestra M1 Crumb test

	
Muestra inicial M1: 13 Julio 2021	M1: Pasados 10min
	
M1: Pasados 20min	M1: Pasados 30min
	
M1: Pasados 60min	M1: Pasadas 24hr

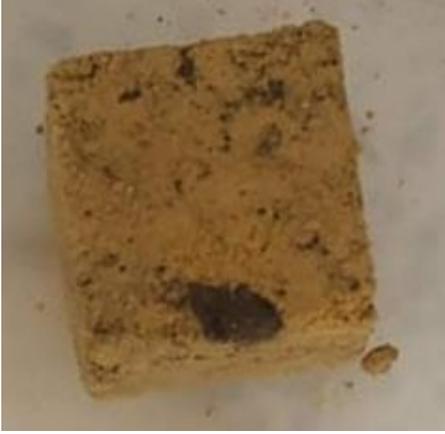
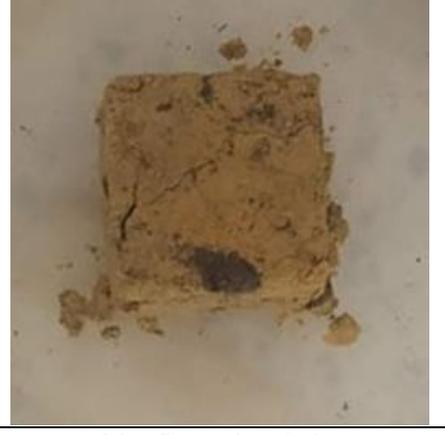
Tabla 24. Muestra M2 Crumb test

	
Muestra inicial M2: 13 Julio 2021	M2: Pasados 10min
	
M2: Pasados 20min	M2: Pasados 30min
	
M2: Pasados 60min	M2: Pasadas 24hr

Tabla 25. Muestra M3 Crumb test

	
Muestra inicial M3: 13 Julio 2021	M3: Pasados 10min
	
M3: Pasados 20min	M3: Pasados 30min
	
M3: Pasados 60min	M3: Pasadas 24hr

Tabla 26. Muestra M4 Crumb test

	
Muestra inicial M4: 13 Julio 2021	M4: Pasados 10min
	
M4: Pasados 20min	M4: Pasados 30min
	
M4: Pasados 60min	M4: Pasadas 24hr

4.3.4 Corte directo

Fueron realizados ensayos de cortes directos convencionales en muestras bajo condiciones de humedad natural de campo y saturados. La humedad natural de la muestra se estima igual a 31.5%. En la Tabla 27 se presentan los parámetros de resistencia obtenidos.

Tabla 27. Parámetros de resistencia obtenidos de ensayos de corte directo realizados en muestras bajo condición de humedad natural de campo y muestras saturadas para el suelo superficial en estudio

Muestra	Parámetros de resistencia			
	Ensayos bajo humedad natural de campo		Ensayos bajo condiciones de saturación	
	C _{nat} (kPa)	Φ _{nat} (°)	C _{inun} (kPa)	Φ _{inun} (°)
Superficial de la parcela	34.00	26.94	12.00	26.32

Bender (1985) considera la erodabilidad en función de la cohesión del suelo en superficie, alterada durante el evento de lluvia. Alvarenga y Carmo (1976) al evaluar suelos residuales de gneis, Facio (1991) al estudiar suelos lateríticos del Distrito Federal y Conciani (1998) destacan el papel de la pérdida de la cohesión con la disminución de la succión matricial en la erodabilidad del suelo tropical.

Bastos (1999) realiza en su trabajo una serie de ensayos en los que, sobre la misma muestra de suelo, se ejecuta un ensayo Inderbitzen y ensayos de corte directo. A partir de esto, pudo observar que los suelos cuya cohesión se reduce significativamente con la humectación por la acción del flujo superficial, son aquellos más susceptibles a la erosión y por lo tanto están asociados a un proceso de erosión hídrica más acelerado. A partir de esto concluyó que, la diferencia entre la cohesión del suelo bajo condiciones de humedad natural y saturado, indica la reducción de la cohesión durante un evento de lluvia que causa la saturación del suelo superficial. Se supone que esta condición ocurre en la superficie del suelo cuando se establece flujo superficial. Este parámetro se define como:

$$\Delta C = \frac{C_{nat} - C_{inun}}{C_{nat}} \quad (4.3)$$

Teniendo en cuenta los parámetros registrados en la Tabla 27, para este caso se obtiene un ΔC igual a 65%.

Bastos (1999) propone que cuando $\Delta C \geq 85\%$, se considera que el suelo es potencialmente erodable. Siendo así, este criterio indica que, para el cambio de cohesión ocasionado en el suelo en estudio debido a su saturación superficial, el suelo no es potencialmente erodable.

4.4 Evaluación de la erodabilidad

4.4.1 Parcela hidro-erosiva

Inicialmente se determina la intensidad y precipitación a la cual fue sometida la parcela de prueba durante los tres eventos evaluados, empleando la Ecuación (3.4). Los valores obtenidos para cada una de ellas se indican en la Tabla 28.

Tabla 28. Magnitud de intensidad y precipitación eventos de lluvia evaluados

N° Lluvia	Vpl (mL)	Apl (cm ²)	t (h)	I (mm/h)	Precipitación (mm)
Lluvia 1	125	81.713	1.53	9.98	15.30
Lluvia 2	240		2.00	14.69	29.37
Lluvia 3	127		2.31	6.73	15.54

Se sabe entonces que la lámina de agua que cayó en la segunda lluvia fue la mayor, mientras que la primera y la tercera fueron similares. Aunque las intensidades varían de 6.7mm/h – 14.7 mm/h, la duración de cada lluvia genera que la lámina de precipitación varíe solo entre 15mm – 29mm.

Empleando la Ecuación (3.5) se conoce la tasa de pérdida de suelo ocurrida en cada lluvia, resultando en lo consignado en la Tabla 29 como Ps. Se observa que el caudal de lluvia registrado para el evento número dos es el mayor seguido por el primer evento y luego el tercero. Sin embargo, aún con ese comportamiento de los caudales la mayor cantidad de suelo erosionado por unidad de hectárea se presentó durante la primera lluvia y la menor cantidad durante la segunda.

El comportamiento descrito con anterioridad indica que en la primera lluvia ocurrió la mayor pérdida de suelo en comparación con los dos eventos restantes. Esto muestra una mayor erosión en la cual juegan un papel importante los siguientes factores:

- La presencia de partículas sueltas sobre la superficie de la parcela, producto del proceso de preparación del área de estudio.
- Una mayor succión bajo las condiciones de humedad de la primera lluvia. Bajo esta situación, sucede que al iniciar la precipitación la capa de agua comienza a cubrir la superficie de la parcela y entra a los poros del suelo por efecto de la succión. Esto hace que la fase aire se encuentre sometida a una presión positiva que, al mismo tiempo, tiende a interrumpir el flujo de infiltración. Cuando la presión de poros positiva que está actuando en el suelo excede su cohesión y la fuerza gravitatoria de las partículas, éstas serán liberadas y por ende serán fácilmente arrastradas por la escorrentía superficial.

Tabla 29. Pérdida de suelo obtenida para cada evento de lluvia evaluado

N° Lluvia	W inicial suelo	t (h)	Qlluvia (cm ³ /s)	Suelo seco erosionado (g)	Ps (kg/ha)	Ps corregida (kg/ha)
Lluvia 1	86.67%	1.53	11.085	130	325	203
Lluvia 2	86.97%	2.00	16.317	64	159	159
Lluvia 3	88.79%	2.31	7.481	70	175	175

Nota: las magnitudes de humedad registradas durante la parcela en campo corresponden al material netamente superficial de la parcela, por lo cual sus valores se observan próximos a la saturación.

Con base en la curva característica del suelo, se tiene que para una humedad igual a 86.67%, la magnitud de succión es pequeña, con un valor menor a 5kPa. Lo anterior describe el estado inicial del suelo antes de comenzar la medición de la lluvia uno. Por lo tanto, se espera que la cantidad de suelo erosionado incluya un porcentaje de suelo arrastrado correspondiente al material suelto que se ubicaba en la superficie de la parcela producto de su adecuación. Partiendo de lo anterior, se realiza una estimación para conocer el porcentaje que representa dicho material con respecto a la cantidad total de suelo erosionado durante este primer evento. Para esto se utilizan los datos de la cantidad de suelo erosionado después de un minuto en el ensayo Inderbitzen. Se emplearán solo los datos de los ensayos donde se trabajan los menores caudales (65cm³/s) y pendientes similares a la de campo. Siendo así se obtiene que al inicio del ensayo Inderbitzen se pierde entre el 32% y el 43% del suelo erosionado en total, representando un promedio de 37.5% (Ver Tabla 30).

Tabla 30. Resumen pérdida de suelo al inicio de los ensayos inderbitzen para $Q=65\text{cm}^3/\text{s}$ y pendiente de campo

Ensayo	Tiempo inicial registrado en el Inderbitzen	Pérdida total de suelo al tiempo inicial del ensayo Inderbitzen (g)	Pérdida total de suelo (g)	% de suelo arrastrado en el tiempo inicial del ensayo
$Q=65\text{cm}^3/\text{s}$ $S= 50^\circ$	1 min	44.7	140.45	32%
$Q=65\text{cm}^3/\text{s}$ $S= 45^\circ$	3 min	36.97	86.71	43%

Considerando que para la primera lluvia el 37.5% del material arrastrado corresponde a suelo suelto sobre la superficie de la parcela, se considera que de los 130gr erosionados, 48.75gr corresponde a dicho material. Por lo tanto se estima que el suelo erosionado total en consecuencia de la lluvia uno es de 81gr. Con base en este dato se presentan los resultados de la lluvia uno sin corregir por suelo suelto y con dicha corrección.

La tasa de desagregación del suelo se calcula según la Ecuación (3.6). Esta tasa no tiene en cuenta solamente la cantidad de suelo erosionado por unidad de área, sino que también involucra el tiempo en el que se erosionó dicha cantidad. Por esta razón esta tasa permite tener una idea de cuál de las tres lluvias generó un proceso erosivo más acelerado. Según los resultados consignados en la Tabla 31, la tasa de desagregación del suelo más acelerada sucedió durante la primera lluvia y la menor se presenta en la tercera lluvia. Esto indica que mediante iba pasando el tiempo, la tasa de desagregación en una misma área de suelo sometida a varios eventos de lluvia, disminuye. Es importante resaltar que estos eventos sucedieron en días diferentes, lo que implica que la primera lluvia generó un cambio en la superficie del suelo y para las dos siguientes, la textura probablemente era diferente debido a este efecto. Se observa entonces que la variación de la tasa de desagregación puede estar influenciada por la humedad inicial del suelo antes del evento.

Tabla 31. Tasa de desagregación del suelo para cada evento de lluvia evaluado

N° Lluvia	Aparcela (m^2)	Mss (kg)	Dc (s)	D ($\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$)
Lluvia 1	4.00	0.130	5520	0.00588
Lluvia 2		0.064	7200	0.00220
Lluvia 3		0.070	8310	0.00210

Finalmente, el índice de erosividad en $\text{g/cm}^2/\text{cm}$ de lluvia, se conoce por la Ecuación (3.7) y se presenta en la Tabla 32. Este índice permite conocer la evolución de la erosión del suelo por unidad de área, en función de la lámina de agua producida por cada lluvia. Esto habla finalmente de la erosividad de la lluvia al indicar cuál es la reacción de pérdida de masa en función de la acción erosiva del agente, en este caso agua, proveniente de la escorrentía superficial.

Tabla 32. Índice de erosividad estimado para cada evento de lluvia

N° Lluvia	precipitación (mm)	Mss (kg)	Índice de erosividad ($\text{g/cm}^2/\text{cm}$ de lluvia)	Índice de erosividad corregido ($\text{g/cm}^2/\text{cm}$ de lluvia)
Lluvia 1	15.30	0.130	<u>0.00212</u>	<u>0.00133</u>
Lluvia 2	29.37	0.064	0.00054	0.00054
Lluvia 3	15.54	0.070	0.00113	0.00113

Lo anterior indica que se tiene un mayor índice de erosividad o es más efectivo el proceso erosivo durante el primer evento de lluvia. Luego se presenta una disminución ante el segundo evento de lluvia para volver a aumentar en el tercero.

Con el fin de obtener una mayor comprensión de la erodabilidad que presentó el material en campo y su relación con los factores discutidos con anterioridad, se realizan las gráficas que se presentan a continuación.

Inicialmente se grafica la Figura 39 con el fin de validar y observar la evolución registrada del material erosionado acumulado por unidad de área y la precipitación acumulada. En esta se aprecia la cantidad total de suelo erosionado en la parcela luego de los tres eventos de lluvia, resultando en un valor de erosión igual a 659kg/ha ó 65.9g/m^2 .

Por otro lado, cuando se observa la variación de dicha erosión con la intensidad de la lluvia (Ver Figura 40) no es posible observar un comportamiento proporcional entre ambas variables. Es posible concluir que la cantidad de material erosionado por unidad de área no es proporcional a la intensidad de la lluvia registrada, ya que para las lluvias 2 y 3 se obtiene una cantidad de suelo erosionado similar aun cuando la lluvia 2 fue más intensa y generó una lámina de precipitación de casi el doble de la tercera.

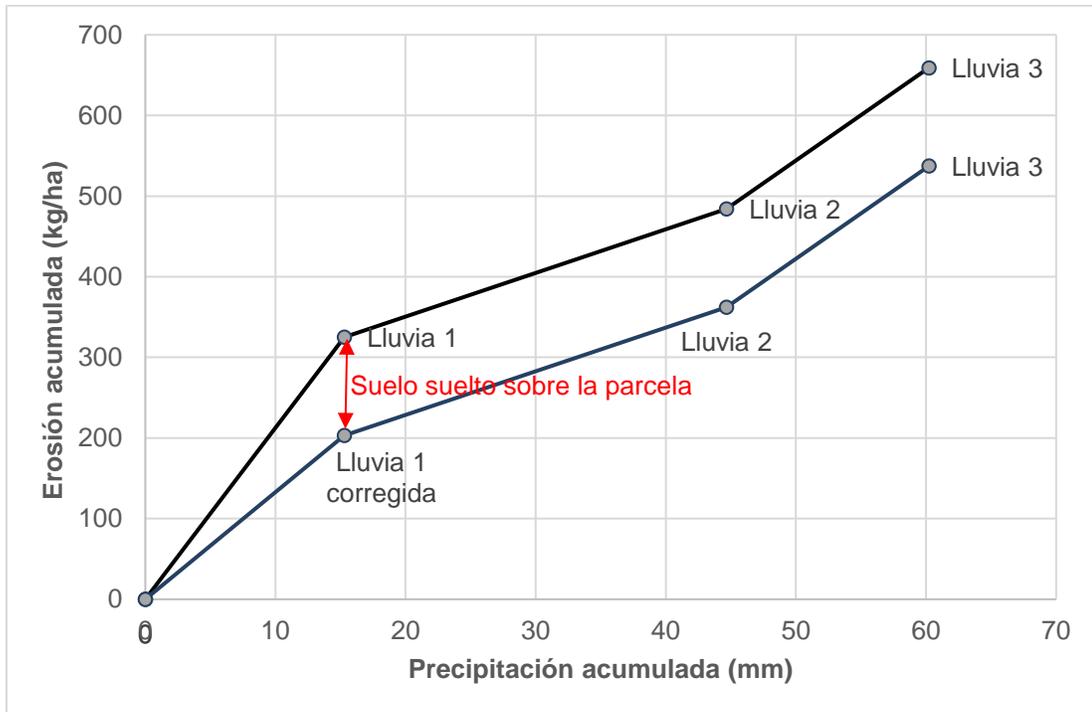


Figura 39. Erosión y precipitación acumulada

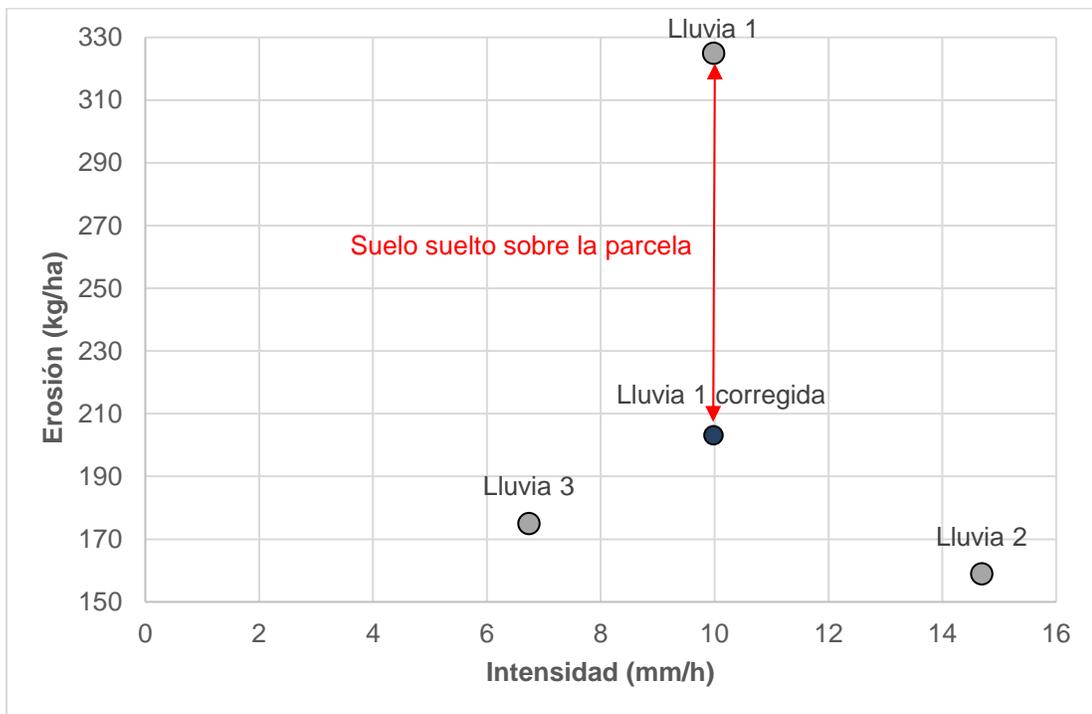


Figura 40. Relación entre erosión e intensidad de la lluvia

Sabiendo esto, se procede a examinar la relación que existe entre la erosión y el caudal de escorrentía registrado en cada lluvia. El volumen de escorrentía fue consignado a partir de la cantidad de agua recolectada en el recipiente que se dispuso al final de la parcela, durante cada evento. A su vez se tiene en cuenta las condiciones de humedad que tenía la parcela justo antes de cada evento de lluvia, ya que como se mencionó en la metodología, la parcela permanecía tapada con plástico durante la espera de cada evento, lo que podía generar un cambio de humedad significativo que en materiales como las cenizas tiene una incidencia importante en su saturación y permeabilidad lo que finalmente condiciona los procesos de infiltración y escorrentía de la lluvia.

A partir de esto se puede concluir que, a medida que el caudal de escorrentía fue mayor, la cantidad de suelo recolectado fue mayor. Esto indica que la magnitud del caudal de agua que terminaba fluyendo sobre el suelo arrastraba de manera proporcional partículas del material.

En la Figura 42 se indica que la humedad de la parcela iba aumentando levemente luego de cada evento de lluvia, debido a que sólo se destapaba para recibir la lluvia. Se observa además que la variación de la humedad inicial del suelo antes de cada lluvia fluctúa entre +/- 4%. Esta variación podría estar dentro del rango de error del ensayo de determinación de contenido de humedad.

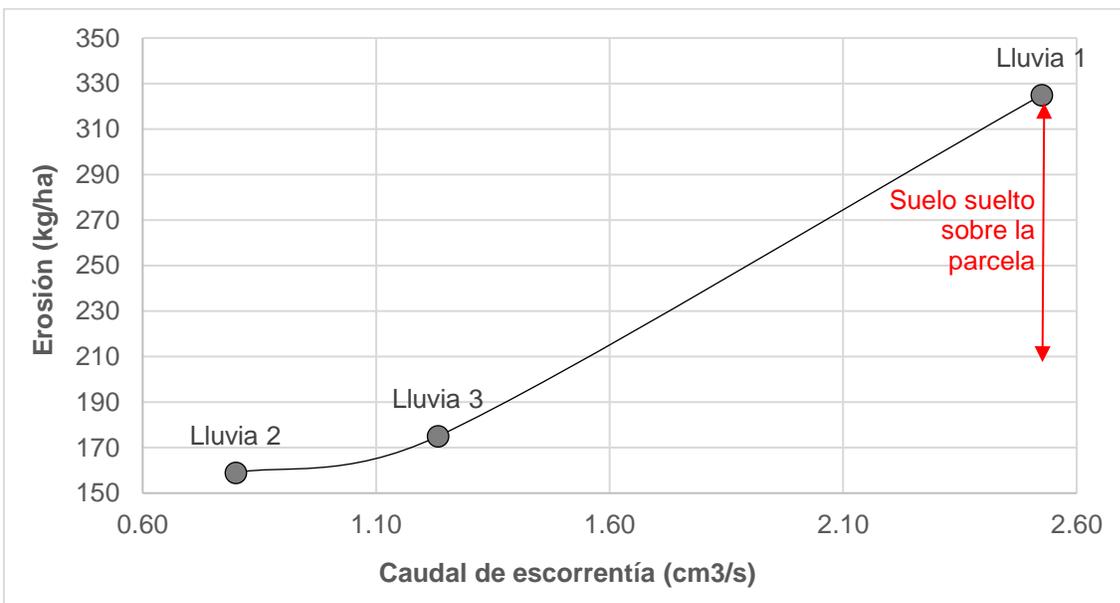


Figura 41. Relación entre el el volumen de escorrentía recolectado en cada evento de lluvia y la erosión del suelo

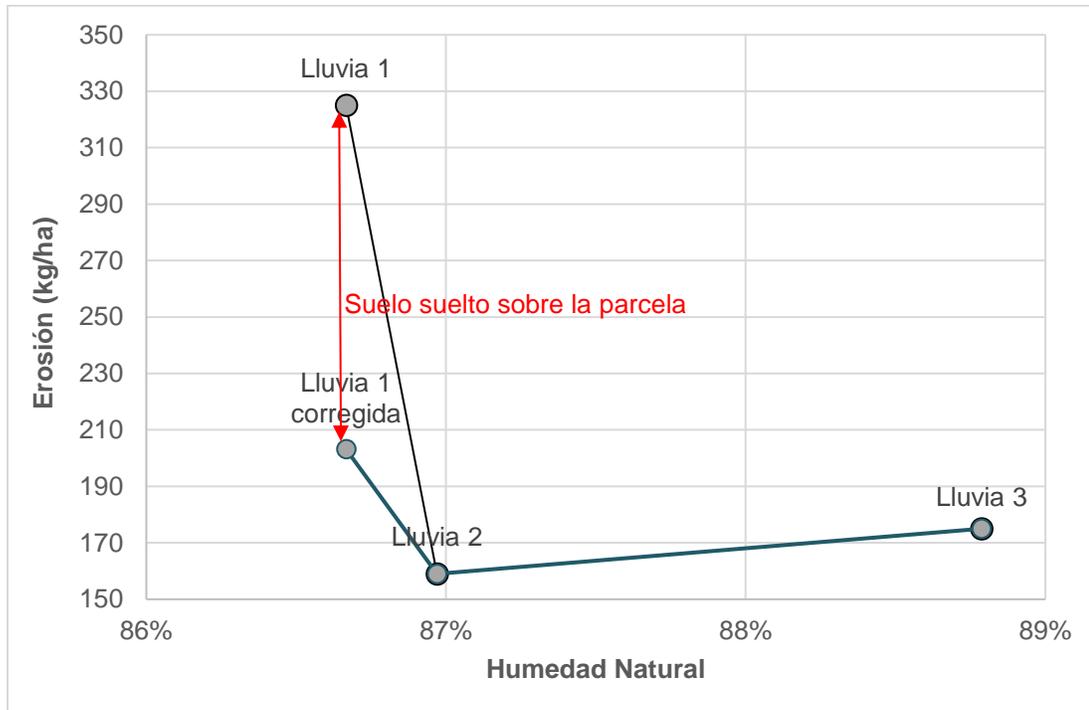


Figura 42. Relación entre la humedad natural del suelo antes de la lluvia y la erosión obtenida

La relación más directa que se observa a través de los análisis anteriores es la del caudal de escorrentía con la erosión. Esto indica que los factores que más influyen en la erosión obtenida mediante la parcela son su condición de infiltración y saturación, ya que la cantidad de suelo erosionado dependerá del tiempo requerido para que el suelo se sature y permita el inicio de la escorrentía superficial.

La relación obtenida entre la intensidad de la lluvia y la erosión permite ver cómo la magnitud del evento de lluvia no es determinante en la erosión de este material sino sus condiciones intrínsecas, ya que serán estas las que determinen tanto la cantidad de escorrentía que podrá formarse y generar el proceso erosivo, como la resistencia mecánica de la ceniza al arrastre.

Sobre la cantidad de suelo erosionado en cada evento de lluvia, se realizan ensayos de hidrómetro con el objetivo de conocer los diámetros de las partículas que fueron arrastradas debido a la escorrentía generada en cada precipitación.

Tabla 33. Partículas más pequeñas movilizadas en cada lluvia

N° Lluvia	Qescorrentía (cm ³ /s)	D partícula más pequeña arrastrada (mm)	Partículas arrastradas de ese diámetro
1	2.53	0.013	1.28%
2	0.80	0.016	1.28%
3	1.23	0.016	1.37%

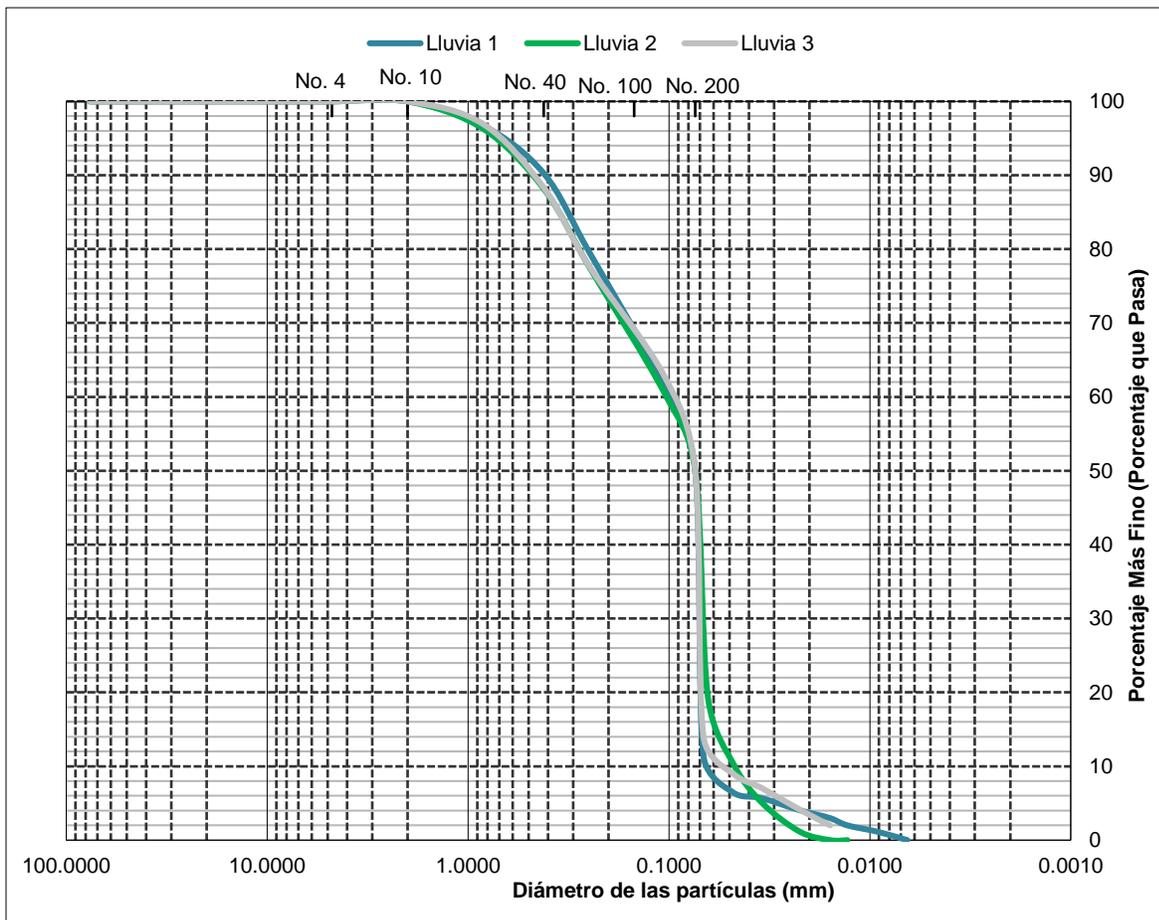


Figura 43. Hidrómetros ejecutados sobre suelo erosionado en parcela de campo

De lo anterior es posible concluir que el 50% del material erosionado contiene fracciones arenosas y el 50% restante está constituido por finos. De estos finos solo el 1% está constituido por partículas de arcilla.

4.4.2 Ensayo Inderbitzen

Ensayos de caudal constante $Q=65\text{cm}^3/\text{s}$, pendiente variable

Se ejecutaron tres ensayos en muestras del suelo superficial con la misma humedad igual a 61% (Ver Tabla 34). A partir del caudal suministrado, la pendiente empleada y las dimensiones de la rampa se verifican las condiciones de flujo apropiadas para el ensayo (Ver Tabla 36). En la Figura 46 se presenta el gráfico de tiempo x peso total acumulado erosionado por unidad de área, considerando todos los datos tomados durante el ensayo. Sin embargo, en la Figura 47 se eliminan las lecturas en el tiempo de un minuto, bajo la consideración de que éste material corresponde al suelo suelto que existe en la superficie de la muestra antes del inicio de la prueba. Esto permite tener una visión más clara del comportamiento de la pérdida de suelo ante la variación de la pendiente. Desde la Tabla 37 hasta la Tabla 39 se presenta el cambio visual que presentó cada muestra durante el ensayo.

Tabla 34. Humedad inicial muestras ensayos Qcte Svariable

Muestra	M1 – S=45°	M2 – S=30°	M3 – S=10°
Humedad inicial	61.12	61.47	61.02

Tabla 35. Medidas de caudales volumétricos para cada ensayo Qcte Svariable

Medida	S=45°			S=30°			S=10°		
	V (m3)	t (s)	Q (cm3/s)	V (m3)	t (s)	Q (cm3/s)	V (m3)	t (s)	Q (cm3/s)
1	1530	23.46	65.22	1600	24.16	66.23	1540	24.00	64.27
2	1560	23.85	65.41	1580	23.96	65.94	1600	24.79	64.54
3	1530	23.39	65.41	1670	25.15	66.40	1630	25.44	64.67
		prom=	65.35		prom=	66.19		prom=	64.49

Tabla 36. Verificación de las condiciones de flujo para los ensayos Qcte Svariable

Ensayo	S=45°	S=30°	S=10°
Altura lámina agua (mm)	0.54	0.64	0.91
Radio hidráulico (m)	0.00054	0.00064	0.00091
Pendiente del canal θ (°)	45.0	30.0	10.0
Q canal abierto (cm3/s)	65.35	66.19	64.49
Velocidad (m/s)	0.60	0.51	0.36
Reynolds	285	288	280
Número de Froude	8	6	4
Flujo=	Laminar	Laminar	Laminar
Régimen=	Flujo Supercrítico	Flujo Supercrítico	Flujo Supercrítico

Tabla 37. Ensayo 1 Caudal constante $Q=65\text{cm}^3/\text{s}$ $S=45^\circ$

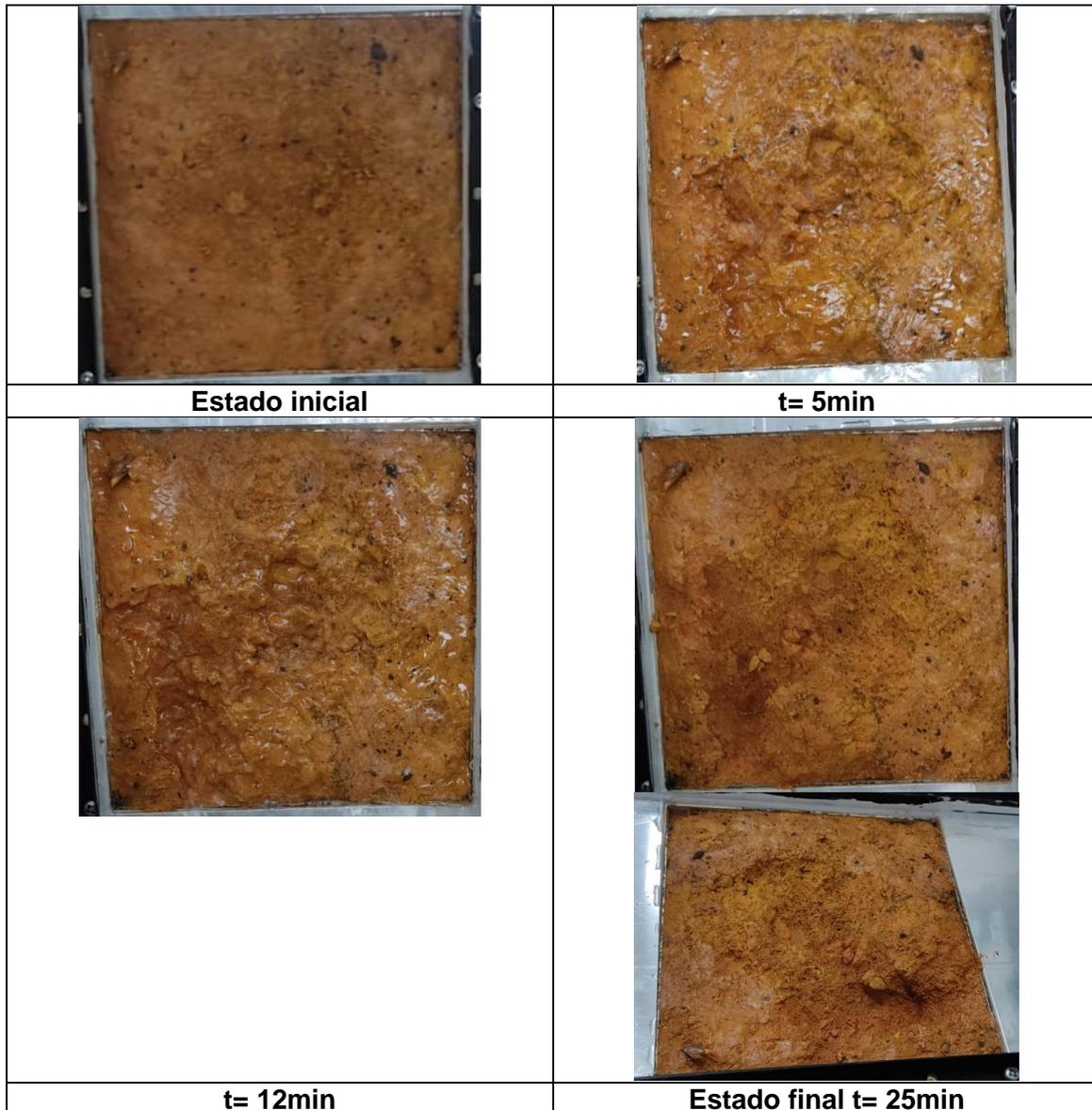


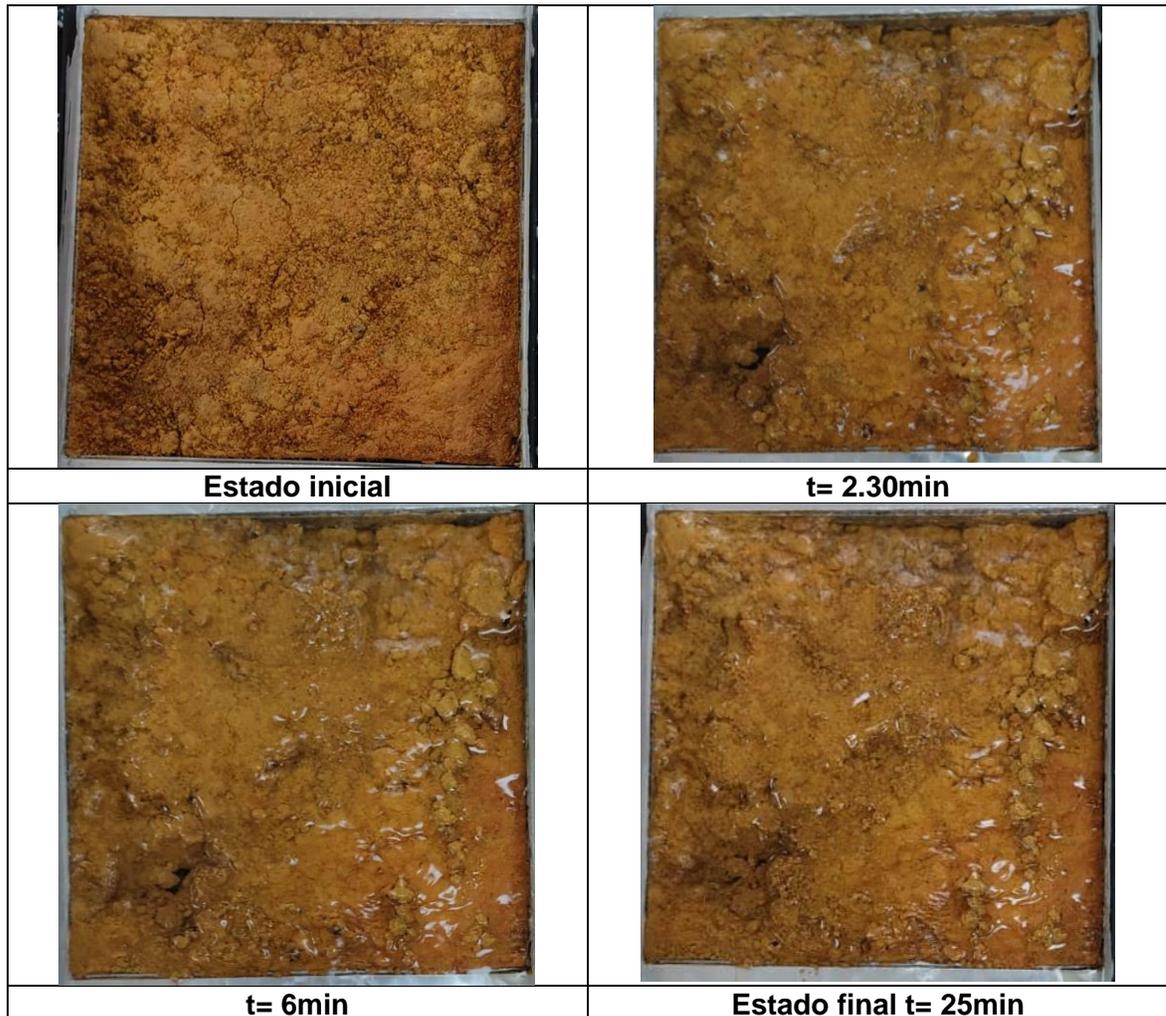
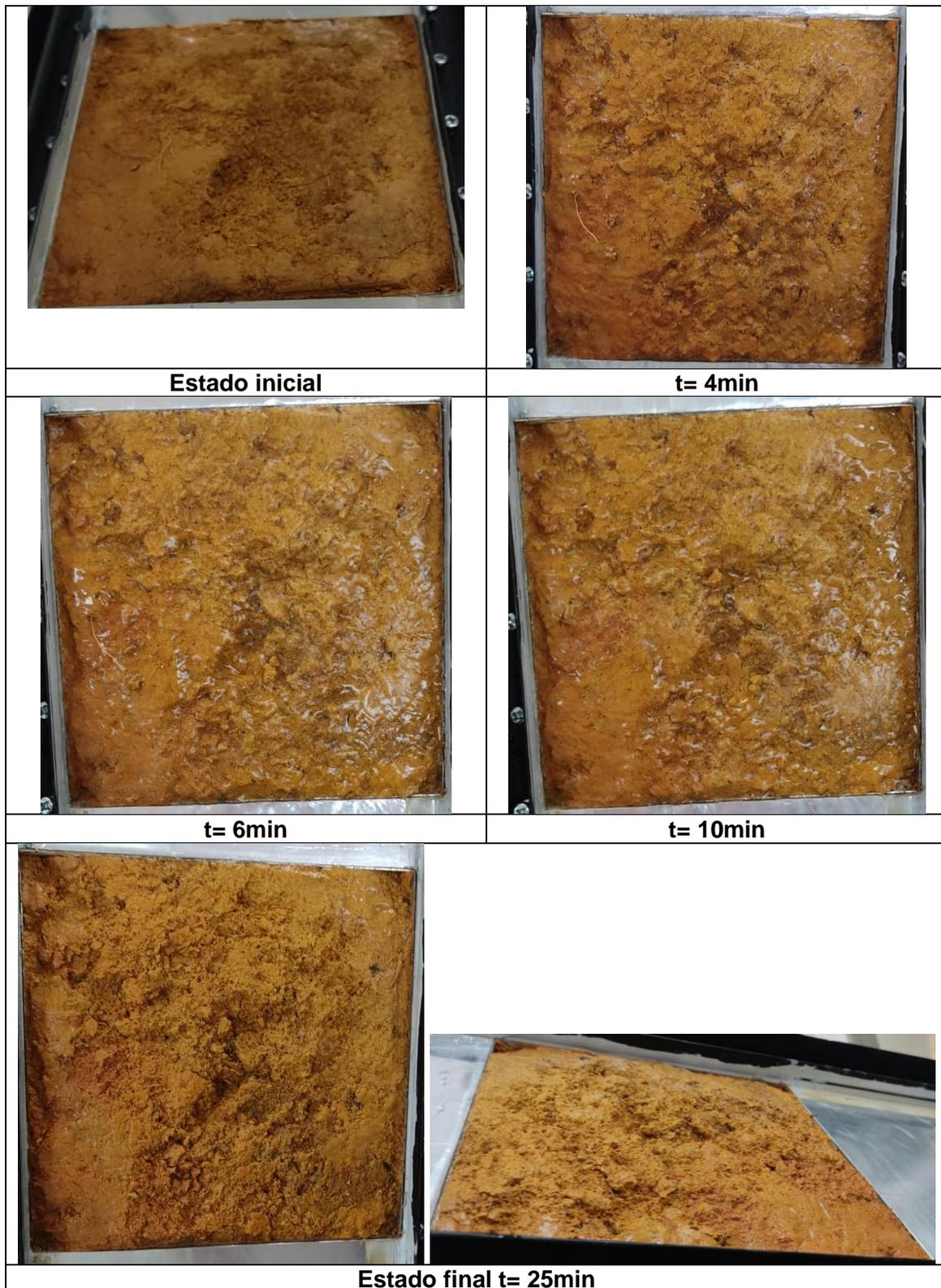
Tabla 38. Ensayo 2 Caudal constante $Q=65\text{cm}^3/\text{s}$ $S=30^\circ$ 

Tabla 39. Ensayo 3 Caudal constante $Q=65\text{cm}^3/\text{s}$ $S=10^\circ$



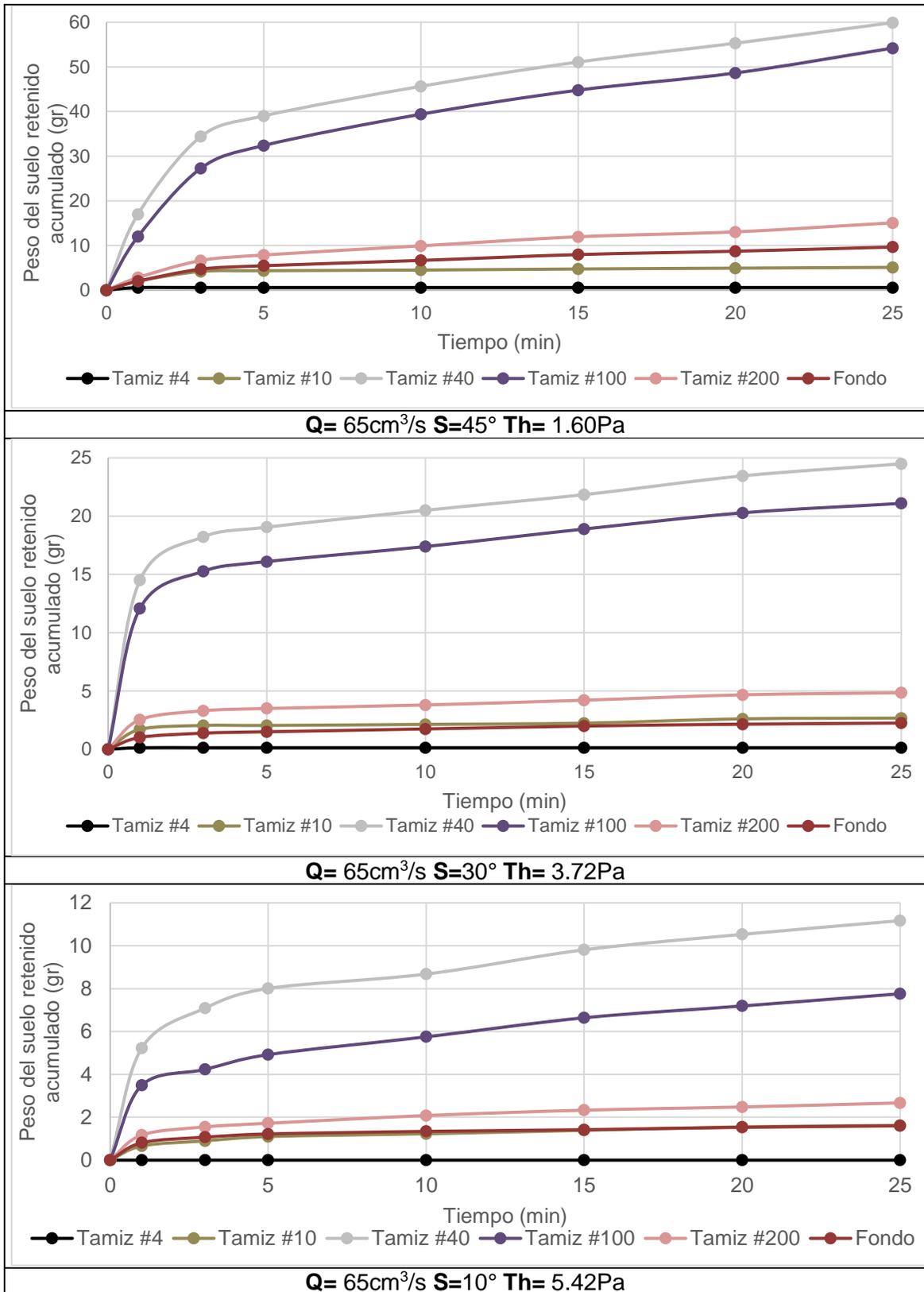


Figura 44. Resultado pérdida de suelo seco acumulado (gr) x tiempo del ensayo (min).
Ensayos de caudal constante, pendiente variable

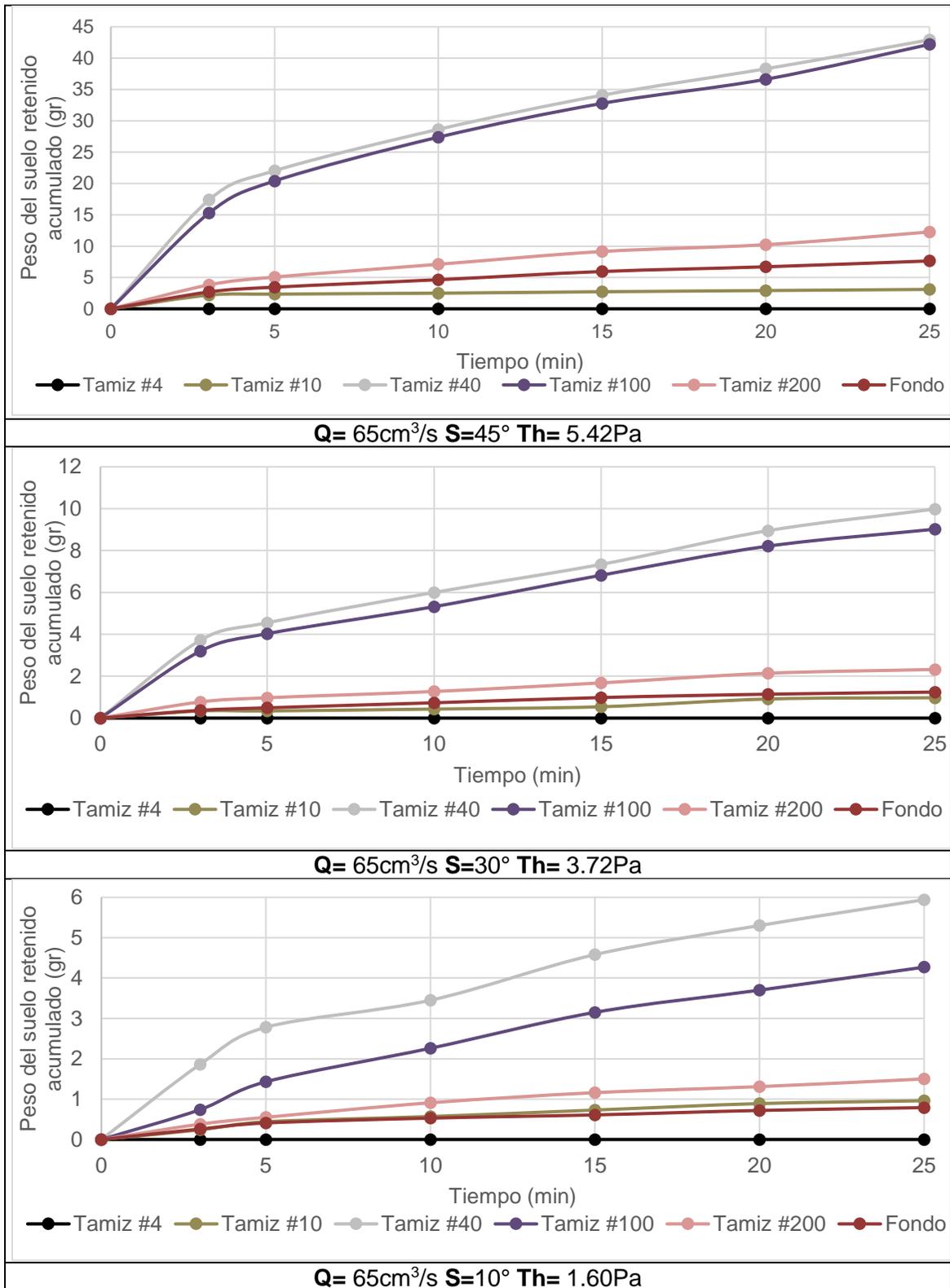


Figura 45. Resultado pérdida suelo seco acumulado (gr) x tiempo ensayo (min). Ensayos de caudal constante, pendiente variable: considerando corrección por material suelto.

De las curvas presentadas con anterioridad es evidente que la cantidad de suelo que se pierde durante los ensayos es primordialmente retenido en los tamices #40 y #100, lo que indica que el mayor porcentaje de suelo erosionado corresponde a fracciones arenosas finas. Esto muestra que las cortantes entre 1.60Pa y 5.42Pa logran movilizar partículas con $0.15\text{mm} < D < 2\text{mm}$. Partículas con diámetros mayores, entre 2mm y 4.5mm son movilizadas componiendo entre el 3% y 7% del material erosionado.

Se observa que cortantes menores o iguales a 5.42Pa no logran movilizar partículas con diámetros mayores o iguales a 4.5mm (retenidos en tamiz #4). Por otro lado, se estima que las partículas finas que logran ser movilizadas por cortantes hidráulicas entre 1.60Pa y 5.42Pa constituyen solo el 6% del suelo erosionado, evidenciando la estabilidad de las agregaciones, observada con anterioridad mediante las curvas granulométricas del material sin el uso de defloculante. Este comportamiento refleja una mayor resistencia a la erosión de las partículas finas debido a su estado de agregación.

De igual manera el material retenido en la malla #200 ($0.075\text{mm} < D < 0.15\text{mm}$) compone el 10% del suelo erosionado, probablemente debido a la plasticidad que exhibe la fracción limosa del material, según la carta de plasticidad de Casagrande.

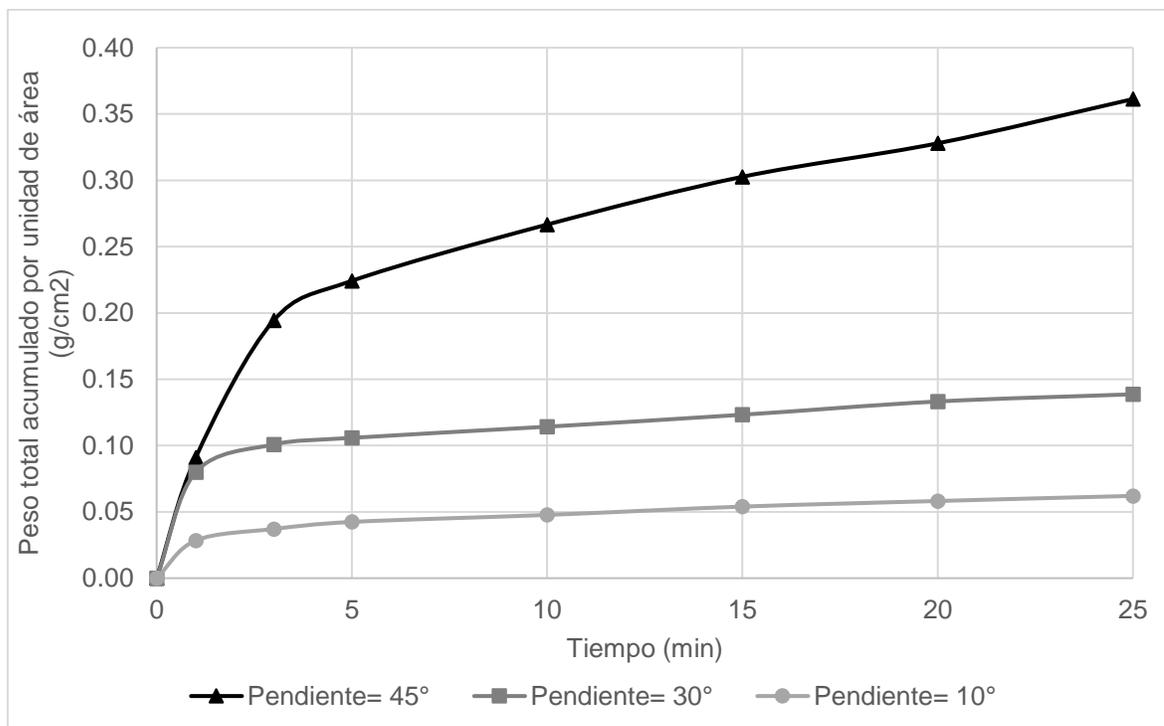


Figura 46. Perdida de suelo acumulado en el tiempo Ensayos de caudal constante $Q=65\text{cm}^3/\text{s}$

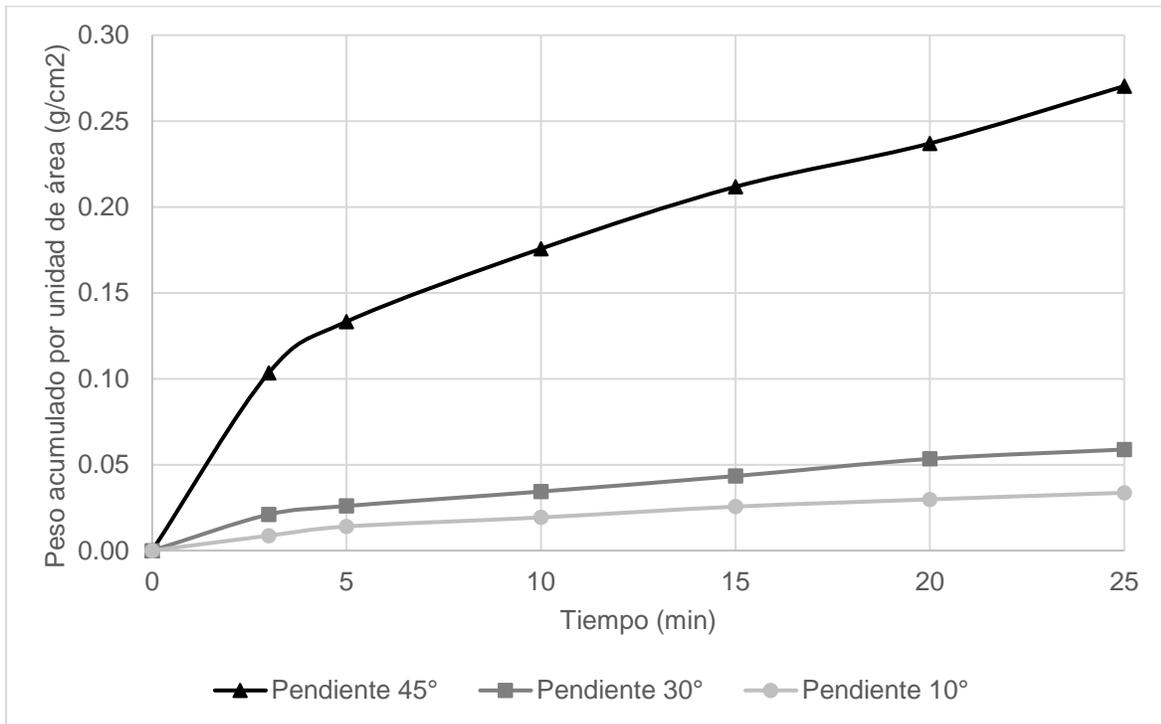


Figura 47. Perdida de suelo acumulado en el tiempo Ensayos de caudal constante $Q=65\text{cm}^3/\text{s}$: con corrección por material suelto.

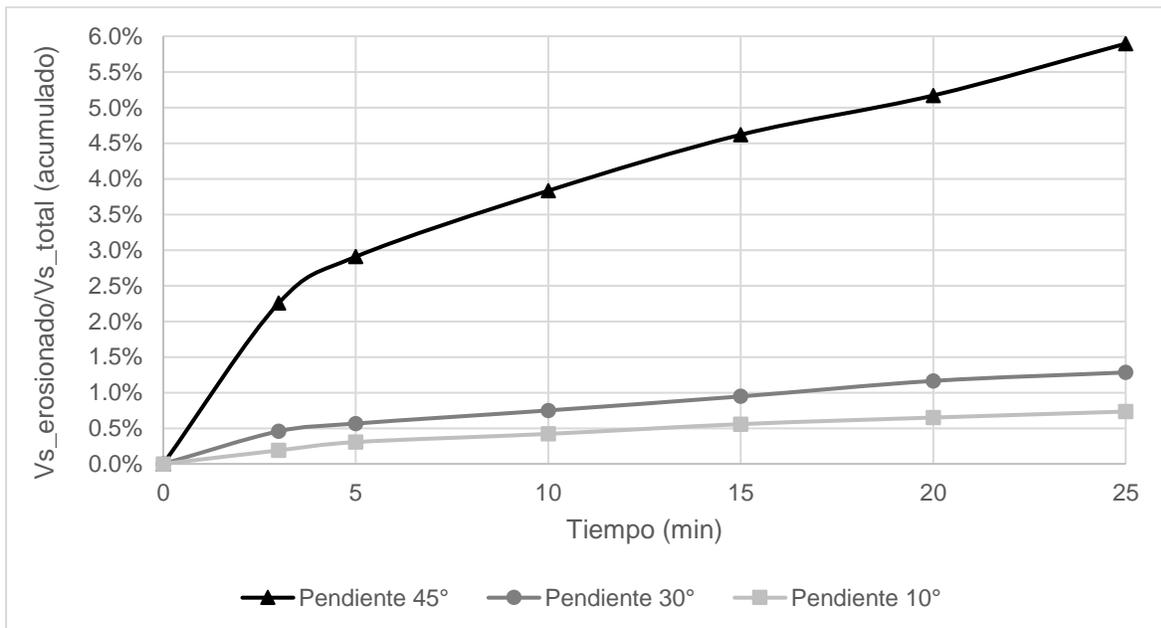


Figura 48. Volumen de sólidos erosionado con respecto al volumen de sólidos total en el tiempo Ensayos de caudal constante $Q=65\text{cm}^3/\text{s}$: con corrección por material suelto

Para estos ensayos se dejó fijo el valor del caudal suministrado y la humedad de la muestra. De esta manera es posible observar más puntualmente la variación de la pérdida de suelo en función de la pendiente del canal. Como se observa en la Figura 47, la pérdida de suelo aumenta conforme la inclinación del Inderbitzen es mayor.

Las curvas presentadas para la pendiente de 10° y de 30° tienden a ser paralelas, lo que permite inferir que el material presente en la superficie de ambas muestras se encontraba en condiciones similares (humedad, densidad, composición, estructura), por lo que la generación de surcos pudo darse en tiempos similares. En ambas es posible observar que la pérdida de suelo disminuye después de los 10min del ensayo. Esta disminución de la pérdida de suelo está influenciada por la profundización de la superficie inicial de la muestra, generada por el proceso erosivo, además de los arcos de tensión que se generan en las esquinas de la muestra. Ambos efectos aumentan la resistencia del suelo al proceso erosivo, hecho que probablemente no ocurrirá en campo.

El cambio en la pérdida de suelo entre las pendientes de 10° y 30° con respecto a la pendiente de 45° es mucho más marcado, ya que se pasa de aplicar cortantes hidráulicas de 1.60Pa y 3.72Pa a una cortante de 5.42Pa, valor que según los resultados logra vencer la resistencia al cortante de las partículas arenosas finas del suelo, logrando arrastrar seis veces más cantidad de muestra. Lo anterior se confirma mediante la Figura 48 donde se observa que para una pendiente de 45° se logra erosionar el 6% del volumen de sólidos de la muestra, mientras que con las pendientes menores se erosiona máximo el 1.5% de los sólidos.

Ensayos de pendiente constante $S=50^\circ$, caudal variable

En este caso se fija la pendiente medida en campo y se varía el caudal según las condiciones de flujo requeridas para el ensayo Inderbitzen. En este caso, las tres muestras empleadas tienen una humedad mayor a las tres anteriormente ensayadas, igual a 66% (Ver Tabla 40). La verificación de las condiciones de flujo se indica en la Tabla 42. Desde la Tabla 43 hasta la Tabla 45 se presenta la condición de la muestra con el tiempo del ensayo. En la Figura 51 se presenta la variación de la pérdida de suelo seco acumulado por unidad de área en función del tiempo, considerando todos los datos tomados durante el ensayo. Sin embargo, se eliminan las lecturas en el tiempo de un minuto, bajo la consideración de que éste material corresponde al suelo suelto que existe en la superficie de la muestra antes del inicio de la prueba. Esto permite tener una visión más clara del

comportamiento de la pérdida de suelo ante la variación del caudal. Desde la Tabla 37 hasta la Tabla 39 se expone el cambio visual que presentó cada muestra durante el ensayo.

Tabla 40. Humedad inicial muestras ensayos Scte Qvariable

Muestra	M1 – Q= 112.5cm ³ /s	M2 – Q= 107cm ³ /s	M3 – Q= 65cm ³ /s
Humedad inicial	66.79	66.76	66.66

Tabla 41. Medidas de caudales volumétricos para cada ensayo Scte Qvariable

Medida	Q= 112.5cm ³ /s			Q= 107cm ³ /s			Q= 65cm ³ /s		
	V (m3)	t (s)	Q (cm ³ /s)	V (m3)	t (s)	Q (cm ³ /s)	V (m3)	t (s)	Q (cm ³ /s)
1	1530	13.63	112.25	560	5.26	106.46	760	11.65	64.27
2	1540	13.71	112.33	690	6.42	107.48	750	11.46	65.45
3	1390	12.32	112.82	925	8.63	107.18	510	7.69	64.67
		prom=	112.47		prom=	107.04		prom=	64.80

Tabla 42. Verificación de las condiciones de flujo para los ensayos Scte Qvariable

Ensayo	Q= 112.5cm ³ /s	Q= 107cm ³ /s	Q= 65cm ³ /s
Altura lámina agua (mm)	0.71	0.69	0.51
Radio hidráulico (m)	0.00071	0.00069	0.00051
Pendiente del canal θ (°)	50.0	50.0	50.0
Q canal abierto (cm ³ /s)	112.47	107.04	64.80
Velocidad (m/s)	0.78	0.77	0.63
Reynolds	490	466	283
Número de Froude	9	9	9
Flujo=	Laminar	Laminar	Laminar
Régimen=	Flujo Supercrítico	Flujo Supercrítico	Flujo Supercrítico

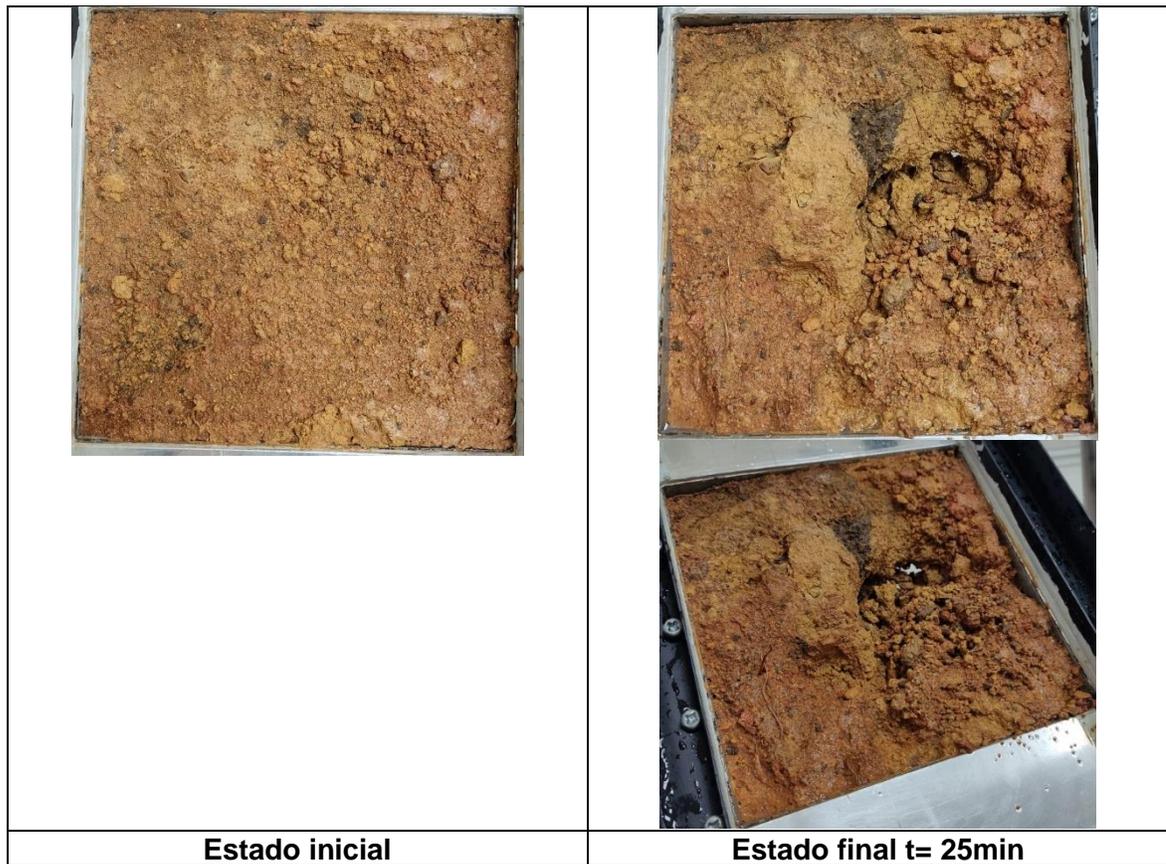
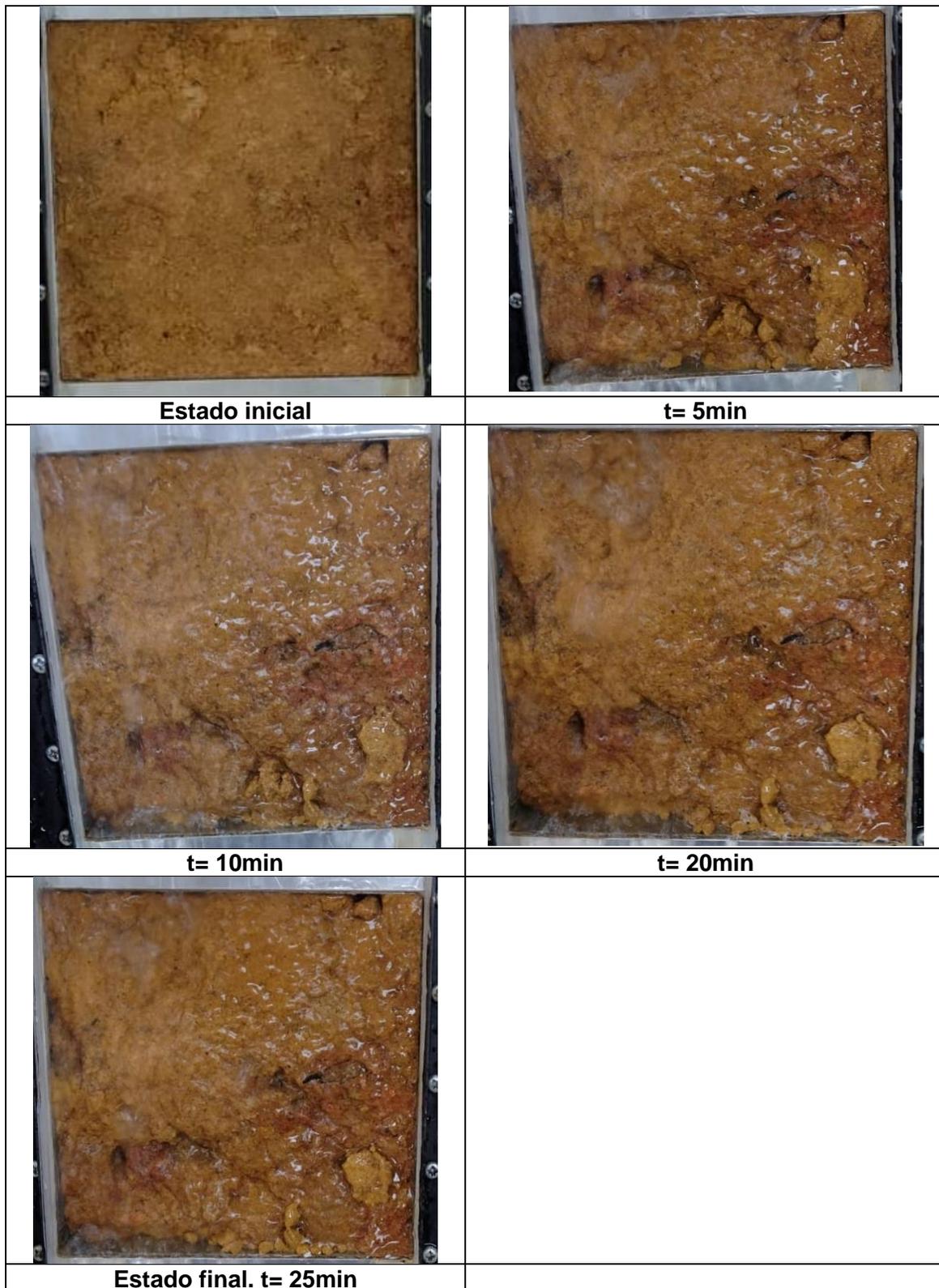
Tabla 43. Ensayo 1 Pendiente constante $S=50^\circ$ $Q=65\text{cm}^3/\text{s}$ **Tabla 44.** Ensayo 2 Pendiente constante $S=50^\circ$ $Q=107.5\text{cm}^3/\text{s}$ 

Tabla 45. Ensayo 3 Pendiente constante $S=50^\circ$ $Q=112.5\text{cm}^3/\text{s}$



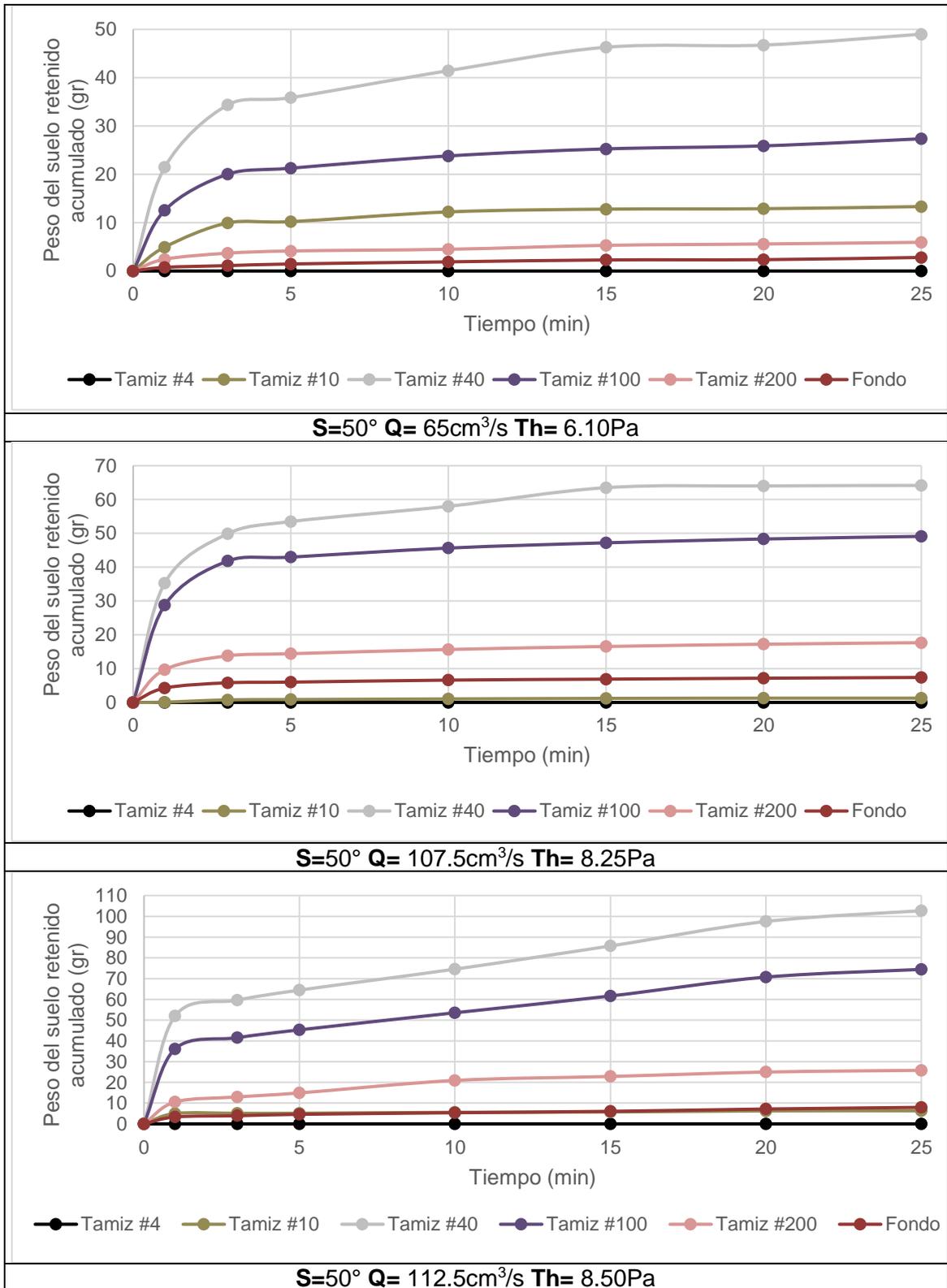


Figura 49. Resultado pérdida de suelo seco acumulado (gr) x tiempo del ensayo (min).
Ensayos de pendiente constante, caudal variable

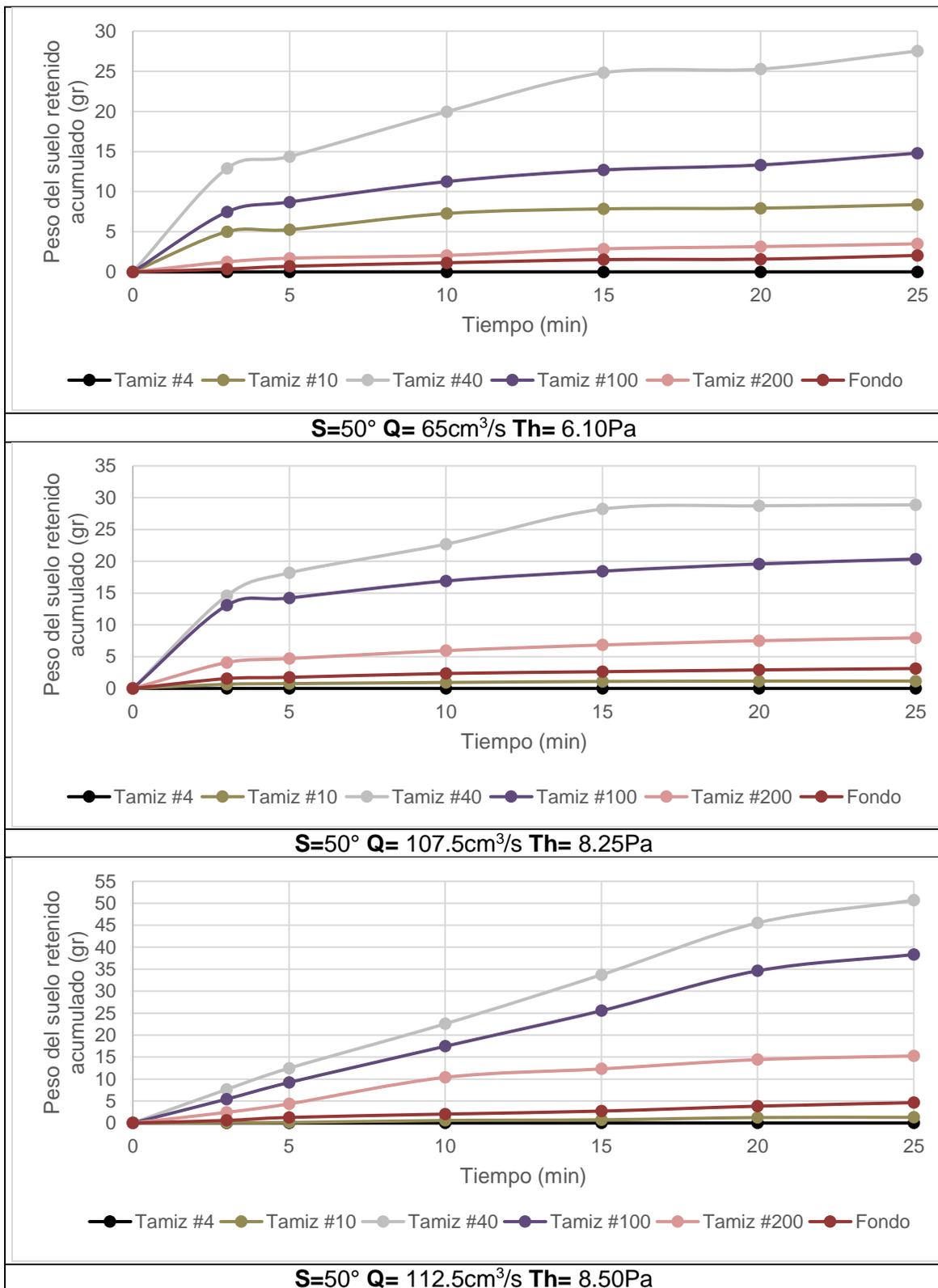


Figura 50. Resultado pérdida suelo seco acumulado (gr) x tiempo ensayo (min). Ensayos de pendiente constante, caudal variable: considerando corrección por material suelto.

De las curvas anteriores se sigue observando que el mayor porcentaje de partículas arrastradas durante el ensayo corresponden a arenas finas. Esto muestra que las cortantes entre 6.10Pa y 8.50Pa logran movilizar partículas con $0.15\text{mm} < D < 2\text{mm}$, las cuales componen en promedio el 78% del suelo erosionado. Partículas con diámetros mayores, entre 2mm y 4.5mm son movilizadas componiendo entre el 1% y 15% del material erosionado.

Se observa que cortantes menores o iguales a 8.50Pa no logran movilizar partículas con diámetros mayores o iguales a 4.5mm (retenidos en tamiz #4). Por otro lado, se estima que las partículas finas que logran ser movilizadas por cortantes hidráulicas entre 6.10Pa y 8.50Pa constituyen solo el 4% del suelo erosionado, evidenciando la estabilidad de las agregaciones, observada con anterioridad mediante las curvas granulométricas del material sin el uso de defloculante. Este comportamiento refleja una mayor resistencia a la erosión de las partículas finas debido a su estado de agregación.

De igual manera el material retenido en la malla #200 ($0.075\text{mm} < D < 0.15\text{mm}$) compone el 13% del suelo erosionado, probablemente debido a la plasticidad que exhibe la fracción limosa del material, según la carta de plasticidad de Casagrande.

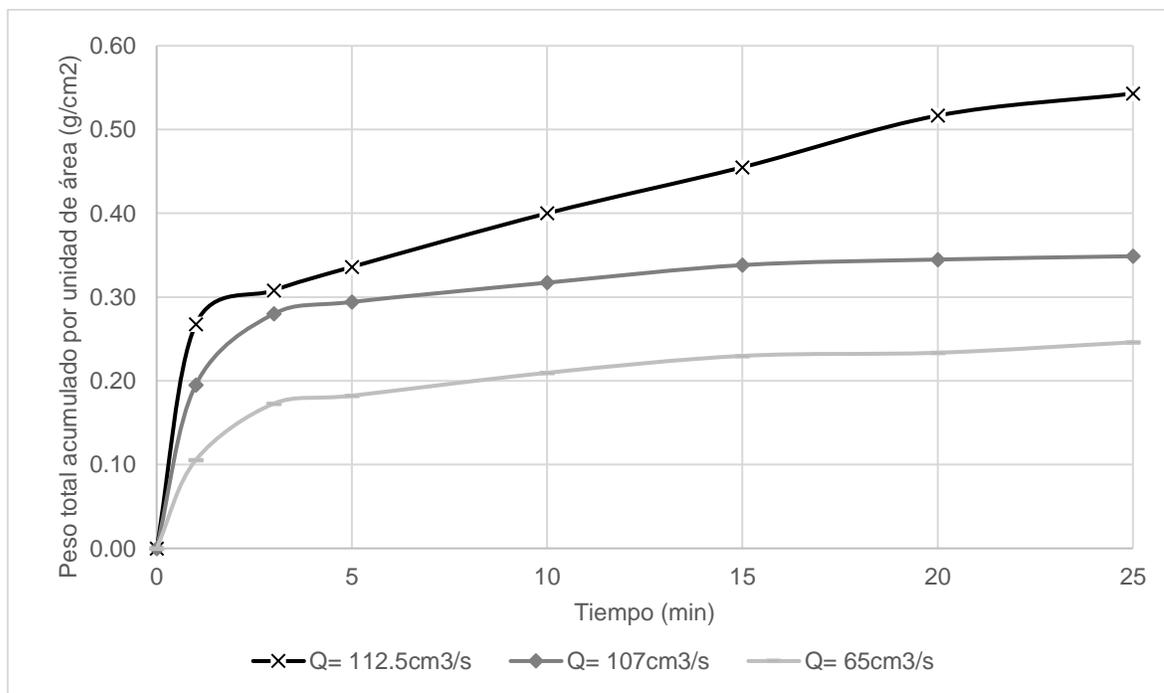


Figura 51. Pérdida de suelo acumulado en el tiempo Ensayos de pendiente constante $S=50^\circ$

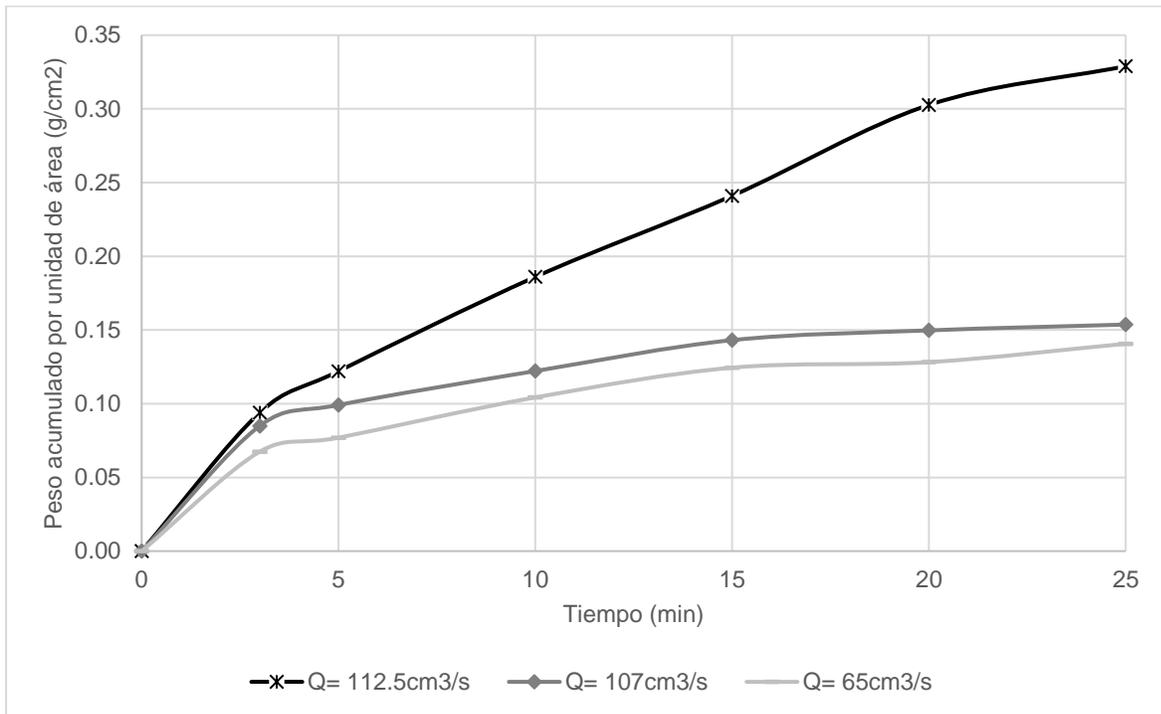


Figura 52. Perdida de suelo acumulado en el tiempo Ensayos de pendiente constante $S=50^\circ$: con corrección por material suelto.

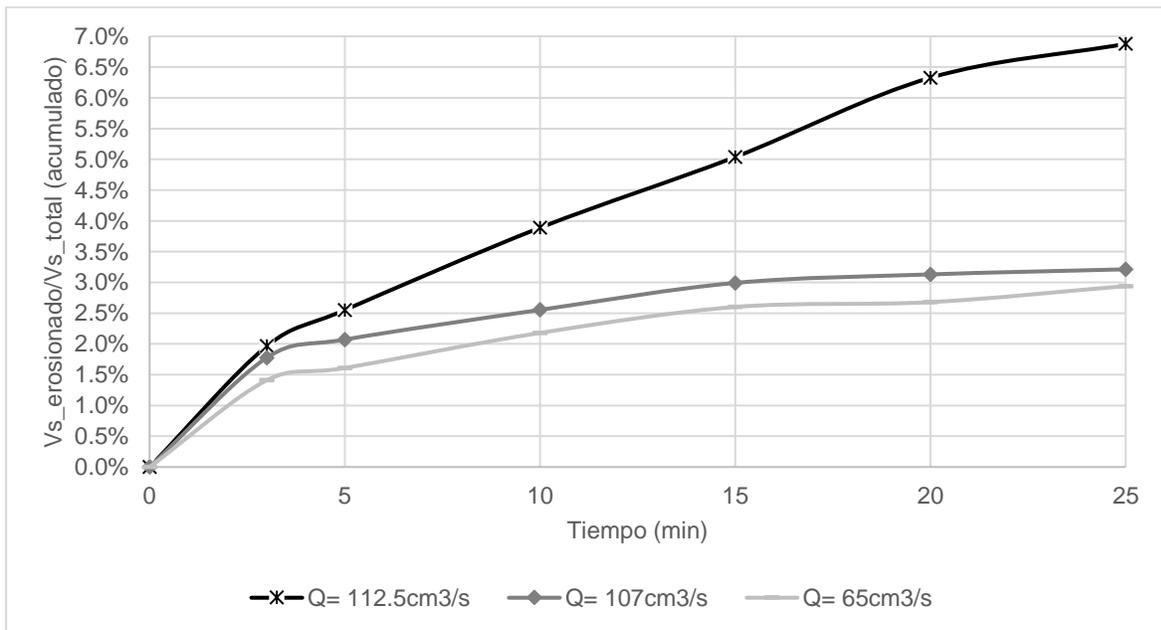


Figura 53. Volumen de sólidos erosionado con respecto al volumen de sólidos total en el tiempo Ensayos de pendiente constante $S=50^\circ$: con corrección por material suelto

La Figura 52 permite ver que la pérdida de suelo acumulada aumenta en el tiempo para caudales mayores, cuando la pendiente y la humedad de las muestras se deja fija. Para los dos caudales menores se observa que la pérdida de suelo disminuye luego de los 15min. Es posible que la pérdida de suelo obtenida en el caudal mayor requería de un tiempo de ensayo más prolongado para lograr estabilizarse.

De igual manera se observa un cambio en la pérdida de suelo más marcada para el caudal mayor, lo que indica que al aplicar una cortante hidráulica de 8.50Pa se logra movilizar una mayor cantidad de material cuyas fracciones son principalmente arenas finas. Según la Figura 53 bajo este caudal se logra erosionar el 7% del volumen de sólidos de la muestra, mientras que con los caudales menores se erosiona máximo el 2.5% del volumen de los sólidos.

En la Figura 54 se grafican la totalidad de los ensayos Inderbitzen ejecutados, seis en este caso, teniendo en cuenta todos los datos registrados durante las pruebas. En la Figura 55 se presentan las curvas de pérdida de suelo acumulado sin incluir el suelo arrastrado durante el primer minuto de prueba, con el objetivo de no incluir el suelo suelto que está en la superficie de la muestra antes de iniciar las pruebas.

Como se observa, cada combinación de caudal y pendiente resulta en una magnitud de cortante hidráulica, la cual es menor para el caso de los ensayos de caudal constante que para el caso de las pruebas con pendiente constante. Esto a su vez indica que la magnitud de la cortante hidráulica aumenta en mayor proporción al aumentar el caudal que al aumentar la pendiente del canal. Lo que se puede observar es que, por lo general, a mayor cortante hidráulica mayor será la pérdida de suelo. Como se sabe que las mayores cortantes hidráulicas se dan con el aumento del caudal, se espera que sea este hecho el que genere una mayor sensibilidad ante las pérdidas de suelo, comparado con la variación de la pendiente.

Cabe aclarar que, las pérdidas de suelo no estarán afectadas únicamente por el impacto del caudal y la pendiente en la cortante hidráulica del suelo, sino también por la distribución de dichas tensiones sobre la muestra, lo que también afectará la erodabilidad del suelo en función de la pendiente de la rampa y del caudal suministrado. Sin embargo, mediante los análisis que componen el alcance de este trabajo no es posible conocer el comportamiento de este último factor durante las pruebas.

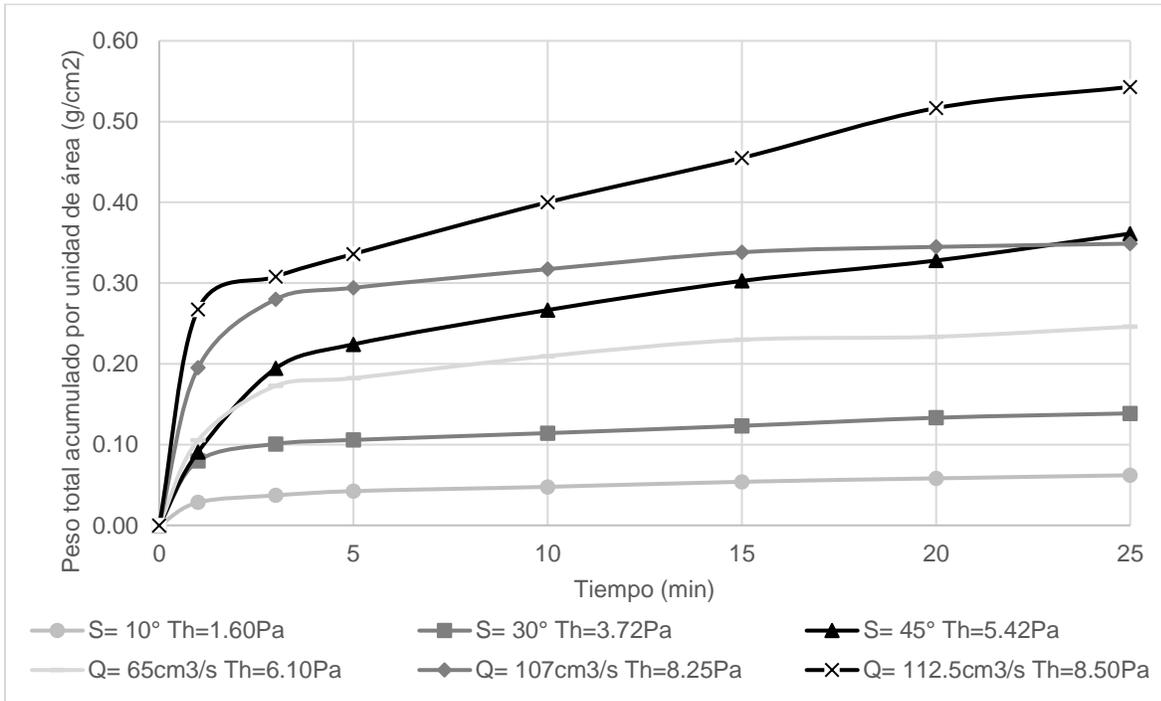


Figura 54. Peso total acumulado por unidad de área x tiempo para todos los ensayos Inderbitzen ejecutados

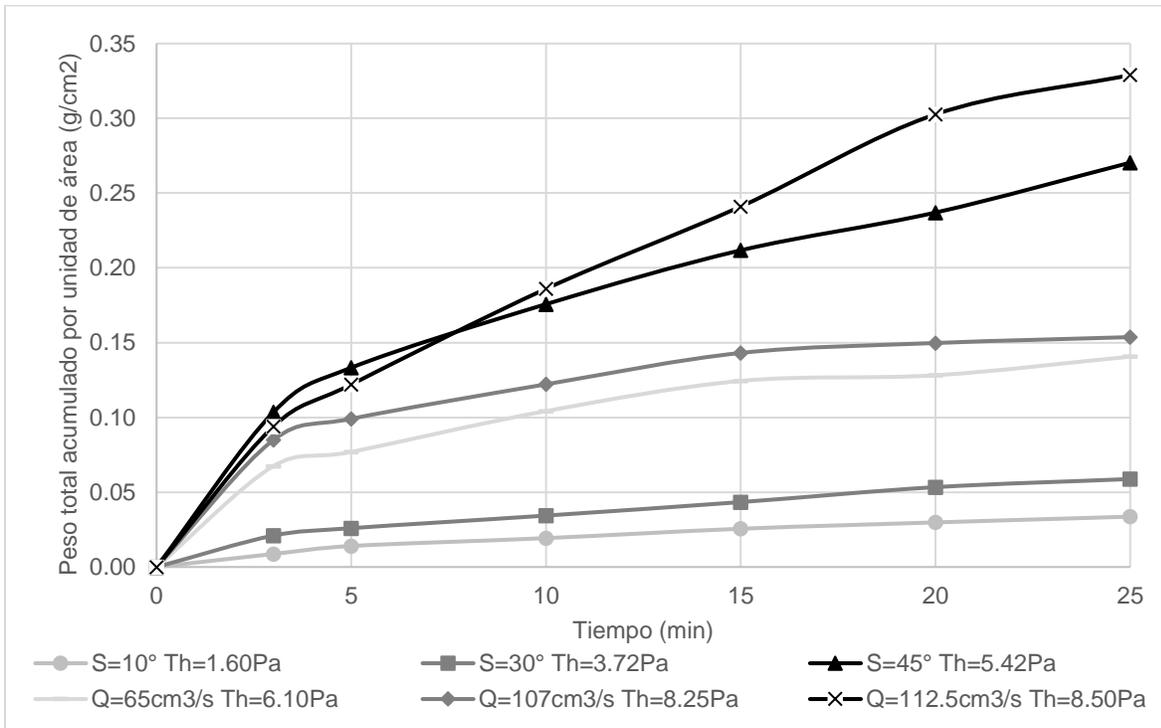


Figura 55. Peso total acumulado por unidad de área x tiempo para todos los ensayos Inderbitzen ejecutados: con corrección por material suelto

4.4.3 Comparación de erodabilidad obtenida en campo y en laboratorio

Erodabilidad (K) obtenida en campo:

La teoría indica que la tasa de desagregación del suelo D_c es proporcionalmente lineal al esfuerzo cortante hidráulico siempre y cuando el flujo de agua de escorrentía sea laminar y se encuentre en un régimen supercrítico. Siendo así se verifica inicialmente las condiciones del flujo que ocurrió sobre la parcela en las tres lluvias.

El caudal de escorrentía mencionado se estima teniendo en cuenta el volumen de agua captado en el recipiente recolector luego de cada lluvia y su respectiva duración (Ver Tabla 47). Como se sabe, la longitud de la parcela es igual a 200cm, cuenta con una pendiente de 50° y teniendo en cuenta que la superficie está conformada en suelo sin vegetación, el valor de n de Manning se considera igual a 0.025 según los valores proporcionados por Chow (1959), se obtienen las siguientes magnitudes para el valor de Reynolds y el número de Froude:

Tabla 46. Verificación del flujo para cada lluvia en la parcela

Ensayo	Lluvia 1	Lluvia 2	Lluvia 3
Base (m)	2.00	2.00	2.00
n manning canal	0.025	0.025	0.025
Altura lámina agua (mm)	0.03	0.02	0.02
Radio hidráulico (m)	0.00003	0.00002	0.00002
Pendiente del canal θ (°)	50.0	50.0	50.0
Q canal abierto (cm ³ /s)	2.53	0.80	1.23
Velocidad (m/s)	0.0452	0.0285	0.034
Reynolds	1.32	0.42	0.64
Número de Froude	2	2	2
Flujo=	Laminar	Laminar	Laminar
Régimen=	Flujo Supercrítico	Flujo Supercrítico	Flujo Supercrítico

Como se observa, la escorrentía que se genera sobre la parcela en las tres lluvias genera flujo laminar y supercrítico, lo que permitiría emplear las expresiones (2.2), (2.3) y (2.4) para estimar el cortante hidráulico del agua.

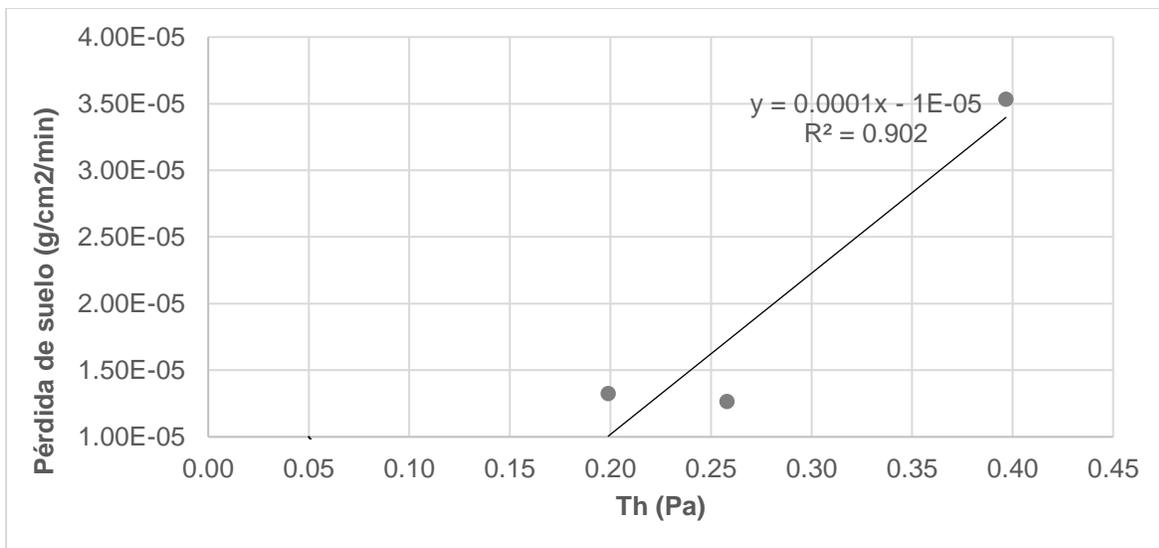
La relación obtenida entre el cortante hidráulico del agua τ_h y la pérdida de suelo se ilustra en la Figura 56. Es importante mencionar que para las tres lluvias la humedad de la parcela oscilaba entre 86.8% y 88.8%.

Tabla 47. Estimación del caudal de escorrentía obtenido a partir de cada evento de lluvia

Lluvia	V escorrentía recolectada (cm ³)	Duración lluvia (s)	Q escorrentía (cm ³ /s)	Pérdida de suelo seco (gr) con corrección por suelo suelto
1	13940	5520	2.53	81
2	5756	7200	0.80	63.6
3	10240	8310	1.23	70

Tabla 48. Determinación del cortante hidráulico y pérdida de suelo para cada evento de lluvia – Parcela de Campo

Lluvia	Qescorrentía (cm ³ /s)	v (cm/s)	Rh	Th (Pa)	Pérdida de suelo (g/cm ² /min)
1	2.53	4.51	0.0033	0.40	0.0000353
2	0.80	2.85	0.0017	0.20	0.0000133
3	1.23	3.39	0.0022	0.26	0.0000126



K (g/cm²/min/Pa)	0.0001
Tcrítico (Pa)	0.10

Figura 56. Determinación del factor de erodabilidad K obtenido en campo

Es evidente que los caudales de escorrentía generados fueron pequeños por lo que la cortante hidráulica del agua varía entre 0.20Pa y 0.40Pa. En consecuencia, el material erosionado fue pequeño (entre 64gr y 130gr). Estos valores resultan en una magnitud de erodabilidad K baja, como se indica en la figura anterior. El cortante hidráulico crítico obtenido en campo es igual a 0.10Pa.

Erodabilidad (K) obtenida en laboratorio, ensayos de caudal constante pendiente variable:

Para este caso se empleó un caudal constante con una tolerancia de $\pm 1\text{cm}^3$ y se evaluaron tres pendientes o inclinaciones de la rampa: 10° , 30° y 45° . A partir de estos datos y considerando que la muestra de suelo tiene una longitud igual a 20cm, es posible estimar el cortante hidráulico del agua, considerando las expresiones (2.2), (2.3) y (2.4). Para ello se tendrá en cuenta un valor de n de Manning referente al aluminio igual a 0.011 según los valores proporcionados por Tomaz (2003).

Según Bastos (1999), el uso de un tiempo muy prolongado para calcular las tasas de erosión puede llevar a una caracterización incorrecta del suelo durante la prueba, ya que sus resultados se ven afectados por el cambio sustancial de la regularidad de la muestra por la cual pasa el flujo superficial. Por lo tanto, 10min era el tiempo estándar adoptado por este autor para el cálculo de las tasas de erosión del suelo, con el fin de obtener la mejor caracterización del proceso. Para el caso de las muestras empleadas en esta investigación, se observa que la formación de surcos se dio entre los 5min y 10min, por lo cual se emplearán los datos de hasta 10min de tiempo para la estimación de la erodabilidad.

Los datos presentados en la Figura 46 se modelan utilizando un ajuste no lineal hiperbólico, empleando la información desde el inicio del ensayo hasta los 10min de ejecución. Esto se realiza con el objetivo de definir la tasa de pérdida de suelo y el valor máximo de acumulación de erosión de una manera rigurosa e imparcial. Según (de Oliveira et al., 2021) el comportamiento hiperbólico de la pérdida de suelo acumulado en el tiempo puede representarse matemáticamente de la siguiente manera:

$$E = \frac{1}{\frac{1}{E_{ult}}t + \frac{1}{a_o}} \quad (4.4)$$

Donde:

E : pérdida de suelo por unidad de área acumulada en cualquier tiempo transcurrido (g/cm^2);

t : tiempo transcurrido (min);

E_{ult} : valor asintótico máximo de E ;

a_o : parámetro de ajuste ($\text{g/cm}^2/\text{min}$).

“El parámetro de ajuste a_o es la tasa de erosión tomada en el origen de la curva de erosión y se puede considerar como la tasa de erosión definida en el modelo WEPP” (de Oliveira et al., 2021):

$$\left. \frac{dE}{dt} \right|_{\Delta t \rightarrow 0} = a_o = D_c \quad (4.5)$$

La regresión no lineal de los datos se indica en la Figura 57. La calidad de los resultados se consideró adecuada para los efectos de este análisis, teniendo en cuenta la cantidad de datos disponibles.

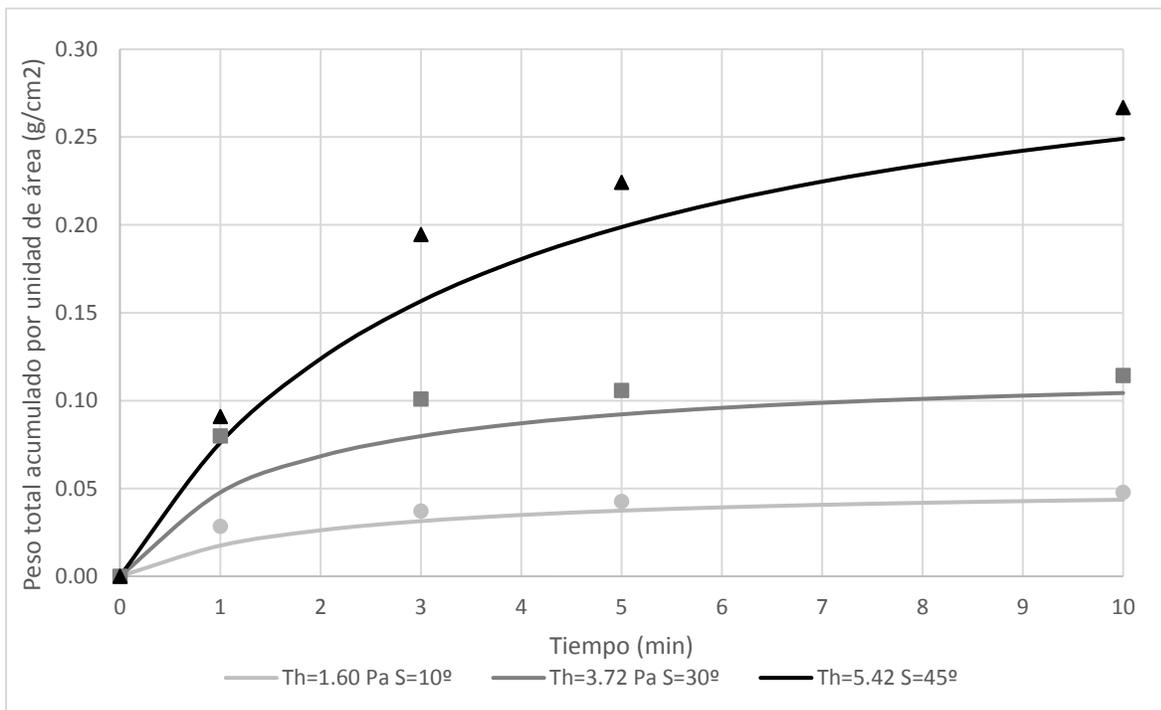
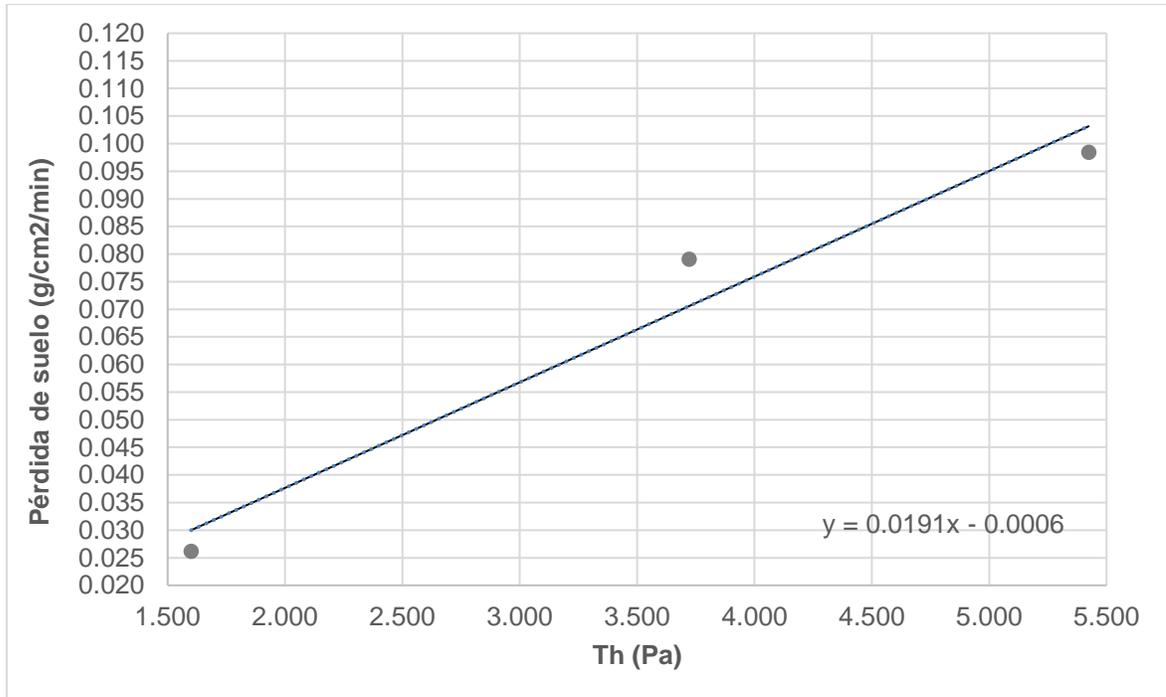


Figura 57. Regresión hiperbólica para ensayos de caudal constante $Q=65\text{cm}^3/\text{s}$

Finalmente, las magnitudes de los cortantes hidráulicos y la pérdida de suelo D_c a los 10min se indican en la Tabla 49. La relación obtenida entre el cortante hidráulico del agua τ_h y la pérdida de suelo se ilustra en la Figura 58.

Tabla 49. Determinación del cortante hidráulico y pérdida de suelo – Ensayos Inderbitzen caudal constante, pendiente variable

Ensayo	Qensayo (cm ³ /s)	v (cm/s)	h (cm)	Rh	l (cm/cm)	η manning	Th (Pa)	Pérdida de suelo (g/cm ² /min)
1 – 45°	65.35	60.24	0.054	0.0539	1.00	0.011	5.42	0.09842
2 – 30°	66.19	51.35	0.064	0.0640	0.58	0.011	3.72	0.07908
3 – 10°	64.26	35.53	0.091	0.0899	0.18	0.011	1.60	0.02621



K (g/cm²/min/Pa)	0.0191
Erodabilidad	Media
τcrítico (Pa)	0.031

Figura 58. Determinación del factor de erodabilidad K obtenido en laboratorio – Ensayos Inderbitzen caudal constante, pendiente variable

Según los criterios expuestos por Bastos (1999), indicados en la Tabla 3, la magnitud de K igual a 0.0191 g/cm²/min/Pa corresponde a un nivel de erodabilidad medio.

Erodabilidad (K) obtenida en laboratorio, ensayos de pendiente constante caudal variable:

Llevando a cabo el mismo procedimiento indicado para los ensayos de caudal constante, pendiente variable, se obtiene la regresión hiperbólica de los datos hasta la duración de 10min (Ver Figura 59). A partir de esta será posible determinar las magnitudes de Dc.

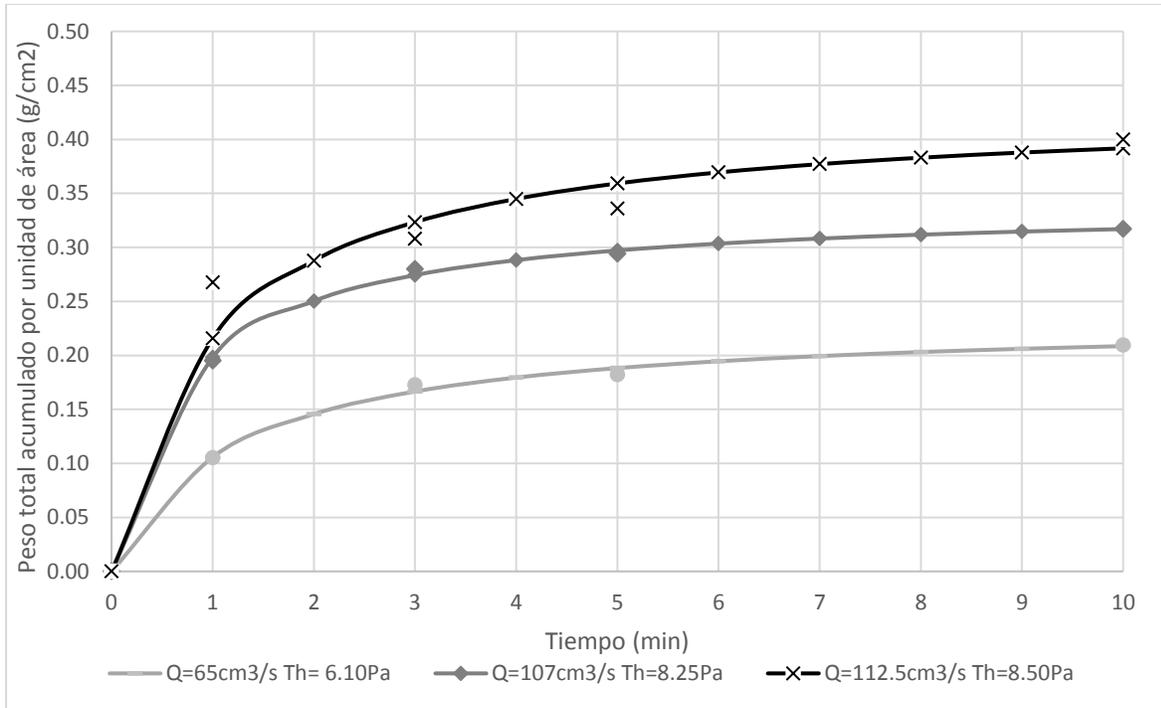
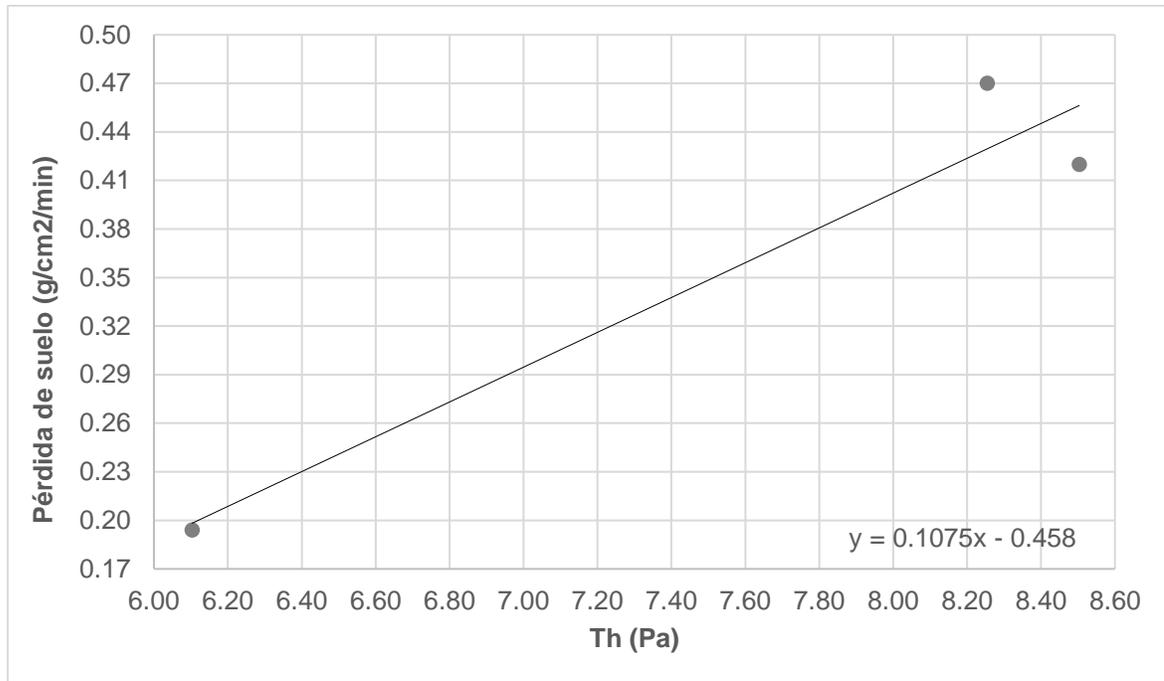


Figura 59. Regresión hiperbólica para ensayos de pendiente constante $S=50^\circ$

De igual manera se procede a calcular la magnitud de las cortantes hidráulicas para graficarlas contra la pérdida de suelo Dc obtenida mediante la regresión. Los valores obtenidos se indican en la Tabla 50 y se grafican en la Figura 60.

Tabla 50. Determinación del cortante hidráulico y pérdida de suelo – Ensayos Inderbitzen pendiente constante, caudal variable

Ensayo	Qensayo (cm³/s)	v (cm/s)	h (cm)	Rh	l (cm/cm)	η manning	Th (Pa)	Pérdida de suelo (g/cm²/min)
1	65.00	63.262	0.0512	0.0510	1.19	0.011	6.10	0.1929
2	107.0	77.275	0.0693	0.0688	1.19	0.011	8.25	0.4755
3	112.50	78.812	0.0714	0.0708	1.19	0.011	8.50	0.4325



K (g/cm²/min/Pa)	0.107
Erodabilidad	Media
τcrítico (Pa)	4.26

Figura 60. Determinación del factor de erodabilidad K obtenido en laboratorio – Ensayos Inderbitzen pendiente constante, caudal variable

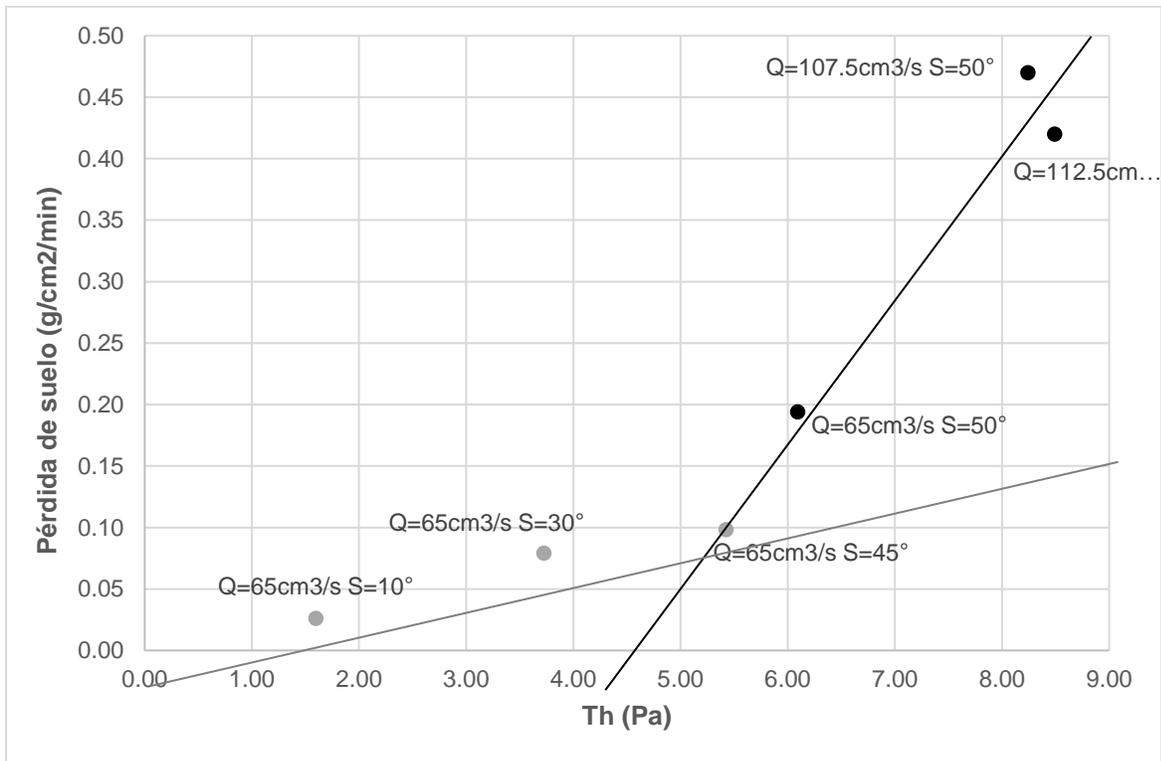
Según los criterios expuestos por Bastos (1999), indicados en la Tabla 3, la magnitud de K igual a 0.107 g/cm²/min/Pa corresponde a un nivel de erodabilidad medio.

Erodabilidad (K) obtenida en laboratorio, todos los ensayos consolidados:

Aunque la totalidad de los ensayos ejecutados se hayan realizado bajo condiciones distintas de caudales y pendientes, estas variables se resumen finalmente en un valor de cortante hidráulico del agua que cae en forma de escorrentía sobre la muestra. Es decir que, para el mismo suelo de prueba se tienen distintas magnitudes de dicha cortante que corresponde a un valor de pérdida de suelo. Esto indica que los resultados de los seis ensayos pueden ser consolidados en una sola gráfica para la estimación de la erodabilidad K. En la Figura 61 se incluyen todos los datos obtenidos para los seis ensayos ejecutados.

Tabla 51. Envoltente de ensayos Inderbitzen para la determinación de la erodabilidad

Ensayo	w inicial (%)	Qensayo (cm ³ /s)	l (cm/cm)	Th (Pa)	Pérdida de suelo (g/cm ² /min)
Q=65cm ³ /s S=10°	61	65.00	0.18	1.60	0.03
Q=65cm ³ /s S=30°	61	65.00	0.58	3.73	0.08
Q=65cm ³ /s S=45°	61	65.00	1.00	5.42	0.10
Q=65cm ³ /s S=50°	66	65.00	1.19	6.09	0.19
Q=107.5cm ³ /s S=50°	66	107.50	1.19	8.24	0.47
Q=112.5cm ³ /s S=50°	66	112.50	1.19	8.50	0.42



w inicial= 61%		w inicial= 66%	
K (g/cm ² /min/Pa)	0.0191	K (g/cm ² /min/Pa)	0.1075
Erodabilidad	Media	Erodabilidad	Media

Figura 61. Pérdida de suelo vs cortante hidráulico, suelo superficial del Oriente Antioqueño

Khanal et al (2020) indican que durante la ejecución de sus pruebas se observa un patrón general donde las muestras con mayor contenido de humedad presentaron una mayor resistencia inicial del suelo a la erosión. Sin embargo, resaltan que una vez inicia la erosión, la tasa de erosión se vuelve mayor, lo que implicaría que la pendiente de la regresión lineal sea mayor para las muestras más húmedas.

Como se ha mencionado, los tres puntos que corresponden a los ensayos de caudal constante se realizaron con humedad igual a 61%. Las otras tres muestras contienen humedades iguales a 66%. En la Figura 61 se observa que el coeficiente de pérdida de suelo (K) es mayor para las muestras cuya humedad es mayor. Esto puede darse debido a que en humedades mayores la succión es menor, ésta actúa durante el inicio de la prueba y pasados unos segundos el flujo comienza a ocurrir por la obstrucción de la fase aire del suelo más superficial. Este efecto genera finalmente que existan un mayor desprendimiento de partículas, amplificando así la erosión.

Lo anterior indica que la erodabilidad del suelo dada por el coeficiente K estará en función de sus condiciones de humedad inicial. Sin embargo, la clasificación cualitativa del material con base en los criterios proporcionados por Bastos (1999) indica en todos los casos que el suelo en estudio corresponde a una erodabilidad media.

Comparación de erodabilidad (K) obtenida:

En resumen, se obtienen valores de erodabilidad empleando la metodología propuesta por Bastos (1999) en la parcela de campo y ensayos Inderbitzen (Ver Tabla 52). Con el objetivo de comparar la erodabilidad de campo con la de laboratorio, se selecciona la $K_{INDERBITZEN}$ obtenida en condiciones de humedad próxima a la parcela de campo. Por esta razón se procede a comparar directamente la magnitud de la erodabilidad obtenida en campo con la obtenida en laboratorio mediante ensayos de pendiente constante - caudal variable.

Siendo así se tiene:

$$K_{laboratorio} = 1122 K_{campo} \quad (4.6)$$

$$\tau_{critico\ laboratorio} = 43.5 \tau_{critico\ campo} \quad (4.7)$$

Tabla 52. Resumen de erodabilidad K obtenida

Ensayo	K (g/cm ² /min/Pa)	τ crítico (Pa)
Parcela de campo (w=86%)	0.0001	0.10
Inderbitzen Qcte (w=61%)	0.019	0.03
Inderbitzen Scte (w=66%)	0.1075	4.26

Los tres ensayos Inderbitzen ejecutados en el paquete de pendiente constante - caudal variable fueron realizados bajo una humedad próxima a la parcela en campo. Como se observa en la Figura 61, estas condiciones del suelo indican que se requiere una cortante hidráulica mayor a 4.26Pa para generar el arrastre de las partículas de suelo y dar inicio al proceso erosivo superficial. Sin embargo, cuando se verifican las cortantes hidráulicas que generó la escorrentía sobre la parcela en campo, se observa que varían entre 0.20Pa y 0.40Pa. Lo anterior significa que es probable que el suelo recolectado en campo no se movilizó en consecuencia de un proceso erosivo ocasionado por el agua, ya que el esfuerzo que el líquido ejerció sobre el suelo no era el suficiente para comenzar a desagregar sus partículas y luego transportarlas.

Siendo así, la cantidad de suelo recolectado en la parcela puede haber sido producto de las partículas sueltas que se encontraban superficialmente sobre su área. Este suelo suelto pudo haberse generado a partir de la construcción de la parcela. Esta situación ocasionó finalmente que la cantidad de suelo recolectado al final fuera de 263.6gr, lo cual representa un porcentaje mínimo de la cantidad de suelo que compone una parcela de 2.00m x 2.00m.

4.4.4 Comparación Kusle y $K_{\text{Inderbitzen}}$

La ecuación del USLE emplea el porcentaje de arena fina, limo, arcilla, materia orgánica y la clase de estructura y permeabilidad del suelo para estimar el valor de la erodabilidad en $t/ha/(t.m/ha.mm/h)$. Al igual que la $K_{\text{INDERBITZEN}}$, el valor obtenido para K_{USLE} tiene una clasificación cualitativa de la erodabilidad del suelo. Considerando las características estudiadas del suelo superficial en estudio, se obtiene la clasificación indicada en la Tabla 53 con base en el valor de K_{USLE} . En la Tabla 54 se indica la clasificación cualitativa de la erodabilidad considerando los valores obtenidos para $K_{\text{INDERBITZEN}}$.

Tabla 53. Clasificación cualitativa erodabilidad según K_{USLE}

Arena fina + limo (%)	Arcilla (%)	MO (%)	Estructura	Clase de permeabilidad	Kusle (t/ha/(t.m/ha.mm/h))	Clasificación
37	30	1.20	4	2	0.29	Erodabilidad Media

Tabla 54. Clasificación cualitativa erodabilidad según $K_{\text{INDERBITZEN}}$.

Ensayo	K (g/cm ² /min/Pa)	Clasificación
Inderbitzen Qcte	0.0190	Erodabilidad Media
Inderbitzen Scte	0.1075	Erodabilidad Media

Es importante resaltar que el ensayo Inderbitzen ha sido concebido para clasificar cualitativamente la erodabilidad del suelo, con base a un valor numérico de $K_{\text{INDERBITZEN}}$. Siendo así, el hecho de que la clasificación de erodabilidad obtenida mediante Inderbitzen y a partir de la USLE coincidan, indica que el ensayo Inderbitzen presenta resultados satisfactorios y similares a los que se obtendría aplicando la Ecuación Universal de pérdida de suelo.

4.5 Conclusiones

- El suelo empleado para la presente investigación cuenta con características y propiedades de ceniza volcánica. Esto hace que su comportamiento sea especial debido a la manera en que este tipo de materiales se originan y se forman. Esta ceniza ubicada en la vereda Alto de la Virgen del municipio de Guarne cuenta con una alta porosidad, una conductividad hidráulica media y minerales de caolinita (68.9%), cuarzo (11.5%) y gibsita (9.6%).
- A partir de las mediciones realizadas en la parcela hidroerosiva es posible observar que la tasa de desagregación del suelo iba disminuyendo con el tiempo. Es decir que el tiempo requerido para que el suelo pierda un kilogramo de suelo por área (m^2) es mayor con el paso de los eventos de lluvia.
- La erosión observada en la parcela luego de cada evento de lluvia era proporcional al caudal de escorrentía que se generaba.
- Se concluye que los factores que más influyen en la erosión obtenida mediante la parcela son su condición de infiltración y humedad inicial, ya que el flujo de escorrentía puede darse por la obstrucción de la fase aire del suelo más superficial. Es importante resaltar que cuando la succión del suelo más superficial es mayor y se tiene una fase de aire continua, al producirse la primera precipitación, esto puede provocar un mayor desprendimiento de partículas amplificando así la erosión.
- La relación obtenida entre la intensidad de la lluvia y la erosión permite ver cómo la magnitud del evento de lluvia no es determinante en la erosión de este material sino sus condiciones intrínsecas, ya que serán estas las que determinen tanto la cantidad de escorrentía que podrá formarse y generar el proceso erosivo, como la resistencia mecánica de la ceniza al arrastre.
- El 50% del material erosionado por cada lluvia en la parcela de campo consiste en fracciones arenosas del suelo y el 50% restante está constituido por finos. De estos finos solo el 1% está constituido por partículas de arcilla.
- Para los eventos de lluvia que sucedieron en campo y la escorrentía que generaron, las magnitudes de cortante hidráulica que ocurrieron en consecuencia no superaron los valores de cortante crítico requerido para iniciar un proceso de erosión superficial. Por esta razón en la parcela de campo no se observó la pérdida de suelo debido a un proceso de erosión superficial, lo que conlleva a que la

magnitud de K (erodabilidad) no pueda ser medida a partir de los datos recolectados y por ende no sea posible estimar el nivel de erodabilidad del suelo con base en las observaciones de campo.

- A partir de los ensayos Inderbitzen ejecutados es posible observar que la cantidad de suelo que se pierde durante los ensayos es primordialmente retenido en los tamices #40 y #100, lo que indica que el mayor porcentaje de suelo erosionado corresponde a fracciones arenosas finas. Se observa que la movilización de partículas finas requiere una fuerza de arrastre del agua mayor. Además, se obtiene que cortantes hidráulicas entre 1.60Pa y 8.50Pa no logran movilizar partículas con diámetros mayores a 4.5mm.
- El estado de la superficie del suelo al iniciar la prueba también se considera un factor importante en la pérdida de suelo, ya que, durante los primeros minutos del ensayo, la pérdida del suelo está dominada por el desprendimiento de las partículas sueltas en la superficie de la muestra. Por esta razón se recomienda no incluir esta medición en los análisis gráficos.
- Además de excluir la pérdida de suelo suelto al inicio de las mediciones, es importante comparar la humedad inicial de la muestra con el objetivo de conocer su estado de succión y a su vez conocer la continuidad o no de la fase aire del suelo al inicio de la prueba de flujo superficial.
- A partir de los ensayos ejecutados, es posible confirmar las afirmaciones realizadas por Facio (1991) acerca del comportamiento general del ensayo:
 - 1) La pérdida de suelo aumenta con el aumento del caudal. (Ver Figura 54)
 - 2) La pérdida de suelo aumenta con el aumento de la inclinación de la rampa. (Ver Figura 51)
 - 3) La pérdida de suelo es mayor durante los primeros cinco minutos del ensayo, lo cual ha sido igualmente verificado por varias investigaciones como la presentada por el Instituto de Investigación Rodoviarias – IPR (1979).
- La magnitud de la cortante hidráulica aumenta en mayor proporción al aumentar el caudal que al aumentar la pendiente del canal. Lo que se puede observar es que, por lo general, a mayor cortante hidráulica mayor será la pérdida de suelo. Como se sabe que las mayores cortantes hidráulicas se dan con el aumento del caudal, se espera que sea este hecho el que genere una mayor sensibilidad ante las pérdidas de suelo, comparado con la variación de la pendiente.

- La erodabilidad depende en mayor proporción de la naturaleza del suelo y las propiedades que su formación le proporcionan. Por esta razón cuando se realiza la medición directa de la erodabilidad con el ensayo Inderbitzen, cualitativamente se obtiene el mismo resultado aun cuando los ensayos se hayan ejecutado empleando diferentes caudales y pendientes. Esto lo indican también autores como Carvalho (1994), Cavalcante & Araújo (2005).
- Actualmente en el contexto colombiano no se cuenta con investigaciones enfocadas en la utilización del equipo Inderbitzen como medida directa de la erodabilidad de un suelo. De ahí la importancia de la presente investigación, donde a partir de la construcción de un equipo simple y a bajo costo se puede conocer de manera directa el nivel de erodabilidad de un suelo. De igual manera, en la literatura disponible acerca de esta metodología, el ensayo no ha sido ejecutado en suelos con características de ceniza volcánica, como fue el caso de la presente investigación; por lo cual los resultados acá presentados aportan a la bibliografía de erodabilidad existente a la fecha.
- De los ensayos Inderbitzen ejecutados, fue posible comparar dos muestras sometidas a un mismo caudal y una pendiente similar, con el objetivo de observar el efecto de la succión en la pérdida de suelo. Para este caso se concluye que entre mayor sea la succión menor es la pérdida de suelo por erosión superficial. No se espera este mismo comportamiento en el caso en que la fase de aire sea continua, ya que en esta situación se genera una presión positiva en los poros lo que provoca el desprendimiento de las partículas. Por esta razón podrían existir magnitudes de succión que aporten al proceso de erodabilidad, escenario distinto al observado en las pruebas realizadas en la presente investigación.
- El análisis de succión llevado a cabo se realizó empleando dos muestras de suelo cuyas humedades naturales fueron altas (61% y 66%). Estos valores se ubican en la zona de menor pendiente de la curva característica del suelo, lo que implica que los cambios en la succión son pequeños. A partir de esto se observa que al tratarse de humedades que implican succiones de magnitud baja y próximas entre ellas, la influencia de la succión para este rango de humedades no es determinante en la pérdida de suelo.
- Al comparar la magnitud de K y $\tau_{crítico}$ obtenidos en campo y en laboratorio, se observa que la relación entre estos valores es la indicada en las ecuaciones (4.6)

y (4.7). De igual manera se resaltar el hecho de que Inderbitzen (1961) indicó en su trabajo inicial que esta medición directa de la erodabilidad permitía conocer de manera cualitativa esta propiedad del suelo. Por esta razón la magnitud de K varía según el procedimiento llevado a cabo para su estimación.

- Teniendo en cuenta lo anterior, la comparación entre la K_{USLE} y la $K_{INDERBITZEN}$ se realiza de manera cualitativa, resultando ambas en la misma clasificación del suelo: erodabilidad media. Siendo así, se indica que el ensayo Inderbitzen presenta resultados satisfactorios que coinciden con la clasificación que se obtendría aplicando la Ecuación Universal de pérdida de suelo.
- Se considera que los criterios de mayor peso son la medición directa usando el Inderbitzen y la estimación mediante la K_{USLE} , debido a que esta metodología es aceptada y aplicada a nivel internacional. Siendo así, se concluye que el suelo superficial identificado como una ceniza volcánica, localizado en la Vereda Alto de la Virgen del municipio de Guarne, cuenta con una erodabilidad media.

- Finalmente, a partir de los resultados obtenidos mediante correlaciones, medidas indirectas y medidas directas de la erodabilidad, se resumen las siguientes clasificaciones para el suelo en estudio:

Tabla 55. Resumen de clasificación erodabilidad del suelo según diversos criterios

Propiedad	Criterio	Autor	Erodabilidad suelo
D50	0.06mm<D50<0.12mm Erodabilidad alta	Henensal (1987)	Media o baja
% Pasa 200	%Pasa 200<35% Erodabilidad media a alta 35%<%Pasa 200<55% Erodabilidad media	Bastos (1999)	Baja
% Pasa 40	49%<%Pasa 40<96%	DNER (1979)	Baja
Cu	Cu > 15 Erodabilidad baja 5 ≤ Cu ≤ 15 Erodabilidad media Cu < 5 Erodabilidad Alta	Santos (2001)	Media
Clasificación USCS	ML>SM>SC>MH>OL>CL>CH>GM>SW>GP>GW	Gray y Leiser (1982)	Media a Alta
e	e>0.70 suelo fácilmente erodable e≤0.70 suelo alta resistencia a la erosión	Bastos (1999)	Alta
IP	IP≤5% suelo potencialmente erodable IP≥10% suelo de baja erodabilidad	Bastos (1999)	Baja
	IP>15% buena resistencia a la erosión IP<6% baja resistencia a la erosión	Santos (2001)	Baja
Doble hidrómetro	20%<%Dispersión<25% erodabilidad media 25%<%Dispersión<50% erodabilidad alta 50%<%Dispersión<25% erodabilidad muy alta	Araujo (2000)	Media a Alta
	RD>15% suelo erodable	Bastos (1999)	Erodable
Crumb test	Alta desagregación = Alta erodabilidad	Araujo (2007)	Baja
Kusle	Kusle < 0.15 erodabilidad baja 0.15 < Kusle < 0.30 erodabilidad media Kusle > 0.30 erodabilidad alta	Carvalho (1994) Cavalcante & Araújo (2005)	Media
Velocidad de erosión	0 < Verosión < 0.8 g/cm ² /h baja erodabilidad 0.8 < Verosión < 25 g/cm ² /h media a alta erodabilidad Verosión > 25 g/cm ² /h alta erodabilidad	Fragassi (2001)	Baja
Permeabilidad	Mayor permeabilidad, menor erodabilidad	Mendes (2006)	Media a Alta
ΔC	ΔC ≥ 85% suelo potencialmente erodable	Bastos (1999)	Baja a Media

-
- En el suelo identificado en esta investigación como ceniza volcánica perteneciente al oriente Antioqueño, se observa que las correlaciones de propiedades que proporcionan resultados congruentes con las medidas directas de erodabilidad obtenidas mediante el ensayo Inderbitzen, son aquellas dadas por las siguientes propiedades físicas: clasificación textural según la USCS, D50, Cu y porcentaje de dispersión. Por esta razón se recomienda evaluar de manera indirecta la erodabilidad de este tipo de suelos empleando las propiedades mencionadas, como criterio preliminar antes de su medición directa.
 - De igual manera se resalta que las correlaciones indicadas en la Tabla 55 relacionan siempre una sola característica del suelo con su erodabilidad, pero en la realidad durante el proceso erosivo son varios los factores que influyen en la erodabilidad del suelo, los cuales interactúan entre ellos resultando en comportamientos particulares del material.
 - La medición directa de la variable indica que el suelo superficial del Oriente Antioqueño estudiado en esta investigación cuenta con una erodabilidad media. Esto mismo indica la Ecuación universal de pérdidas de suelo al calcular la magnitud de K_{USLE} . Criterios que se basan en propiedades como la relación de vacíos, su textura, su propiedad de desagregación y su permeabilidad; indican también una erodabilidad media del suelo.
 - De igual manera se resalta el hecho de que la mayoría de las correlaciones empleadas en el análisis han sido obtenidas con base en las observaciones de investigadores sobre suelos que no pertenecen a la región colombiana y que además son caracterizados como suelos tropicales, en su mayoría. Por lo tanto, este aspecto podría implicar que dichas correlaciones no se ajusten de manera adecuada para el tipo de suelo en estudio.

4.6 Recomendaciones

- En la prueba original Inderbitzen (1961) emplea una muestra de suelo circular con un diámetro y una altura de 15.20cm (6 pulgadas). Este diámetro es similar al adoptado en el ensayo de CBR (California Bearing Ratio) de acuerdo con la NBR7182. Estas mismas dimensiones fueron empleadas por otros investigadores como Fragassi y Marques (2001), sin embargo, el diámetro de anillo que ha sido más frecuentemente utilizado es el de 10cm, empleado por Fácio (1991), Santos (1997), Freire (2001) y Lemos (2002), influenciados por la propuesta de estandarización de Fácio (1991) y por la similitud con el diámetro del molde cilíndrico utilizado en el ensayo de compactación Proctor normal según NBR7182. (Chamecki, 2002). Sin embargo, Inderbitzen (1991) indica que entre mayor sea el área expuesta del suelo, mayor será la precisión de los resultados de la prueba. Por lo tanto, se recomienda que la muestra de suelo tenga las mayores dimensiones posibles conservando la facilidad de su transporte y manipulación a la hora de montarla y desmontarla de la rampa Inderbitzen.
- Al igual que lo concluye Chamecki (2002), el equipo Inderbitzen no debe confundirse con un modelo a escala ya que no hay manera de garantizar la similitud física entre el proceso erosivo que ocurre en el talud natural y el simulado en laboratorio mediante el Inderbitzen. Incluso, aun agregando un simulador de lluvia en el modelo, no existe similitud entre la escorrentía en la rampa y la de campo. La energía erosiva de la lluvia cambia en función de distintas variables como son: la intensidad, la velocidad, la energía de la lluvia y, en consecuencia, el trabajo erosivo será distinto en campo y en laboratorio. Por esta razón los caudales simulados deben seleccionarse sólo para que su magnitud permita un flujo uniforme laminar y genere un régimen supercrítico sobre la rampa.
- El ensayo Inderbitzen permite generar cortantes hidráulicas controladas a partir de la magnitud del caudal suministrado y de la pendiente de la rampa asignada. Por esta razón se recomienda realizar inicialmente los ensayos del material en laboratorio, con el fin de conocer la cortante hidráulica crítica necesaria para generar la movilización del material. Se recomienda partir de este dato para simular los caudales en campo y asegurar que las cortantes hidráulicas que se generen en

este escenario superen la crítica y se pueda realmente observar el proceso de erosión superficial.

- Con el objetivo de verificar la influencia de la succión en distintas humedades del material, se recomienda realizar ensayos de succión e Inderbitzen sobre el suelo bajo una mayor cantidad de valores de contenido de humedad del material, con el objetivo de generar una curva característica del suelo más discretizada y así conocer de manera detallada y precisa la relación entre succión y erodabilidad del material.
- La concepción del equipo Inderbitzen hasta la fecha no incluye un mecanismo para medir la infiltración del suelo durante su ejecución. La presente investigación identificó que la infiltración del agua en el suelo es de importancia para la comprensión de su erodabilidad. Por lo tanto, se recomienda que para futuros estudios se adapte un mecanismo o metodología que permita medir esta variable durante el ensayo.
- Si se pretende realizar una calibración de los resultados de erodabilidad obtenidos en campo con los encontrados mediante el ensayo Inderbitzen, en laboratorio, se recomienda emplear una mayor cantidad de eventos durante las pruebas en parcelas de campo. Para esta labor se sugiere generar los caudales en campo de manera artificial, con el objetivo de obtener caudales similares en campo y en laboratorio además de poder realizar una base de datos más robusta para el análisis. Adicionalmente, se recomendaría efectuar los ensayos en diferentes tipos de suelos que permita generalizar el uso del equipo en la determinación de la erodabilidad en cualquier suelo.
- Se recomienda verificar los umbrales proporcionados mediante las expresiones que correlacionan las propiedades del suelo con la erodabilidad, con la finalidad de constatar si dichas expresiones pueden ser consideradas adecuadas para el contexto colombiano.

A. Anexos: Ensayos de laboratorio

Humedad:

MUESTRA	AP1-M4 (1)		
Profundidad [m]	0.00 - 1.00		
Tara No.	A40	A172	A183
Suelo Hum+Tara (g)	31.22	32.68	34.59
Suelo Seco+Tara (g)	26.73	28.23	29.34
Tara (g)	19.13	20.83	20.48
Humedad (%)	59.08	60.14	59.26
Humedad (%)	59.49		

MUESTRA	AP1-M4 (2)		
Profundidad	0.00 - 1.00		
Tara No.	A87	A31	A223
Suelo Hum+Tara (g)	33.34	36.30	36.56
Suelo Seco+Tara (g)	27.99	30.36	30.02
Tara (g)	19.09	19.56	18.99
Humedad (%)	60.11	55.00	59.29
Humedad (%)	58.14		

MUESTRA	AP1-M4 (3)		
Profundidad	0.00 - 1.00		
Tara No.	A83	A41	A220
Suelo Hum+Tara (g)	35.12	36.29	36.08
Suelo Seco+Tara (g)	29.79	30.20	29.86
Tara (g)	21.22	19.81	19.48
Humedad (%)	62.19	58.61	59.92
Humedad (%)	60.24		

MUESTRA	AP1-M4 (4)		
Profundidad	0.00 - 1.00		
Tara No.	A283	T8	A200
Suelo Hum+Tara (g)	51.32	55.16	51.59
Suelo Seco+Tara (g)	40.35	45.70	41.69
Tara (g)	20.14	23.86	25.23
Humedad (%)	54.28	43.32	60.15
Humedad (%)	52.58		

MUESTRA	AP1-M4 (5)		
Profundidad	0.00 - 1.00		
Tara No.	A83	A183	A172
Suelo Hum+Tara (g)	44.88	53.47	57.62
Suelo Seco+Tara (g)	36.10	42.01	44.88
Tara (g)	21.21	20.47	20.82
Humedad (%)	58.97	53.20	52.95
Humedad (%)	55.04		

MUESTRA	AP1-M3 (1)		
Profundidad	0.00 - 1.00		
Tara No.	AA104	A9	T8
Suelo Hum+Tara (g)	37.71	46.47	46.35
Suelo Seco+Tara (g)	31.07	38.15	37.55
Tara (g)	20.29	25.15	23.86
Humedad (%)	61.60	64.00	64.28
Humedad (%)	63.29		

MUESTRA	AP1-M3 (2)		
Profundidad	0.00 - 1.00		
Tara No.	A200	A155	A219
Suelo Hum+Tara (g)	46.58	43.07	43.35
Suelo Seco+Tara (g)	38.25	34.48	34.74
Tara (g)	25.24	21.09	20.89
Humedad (%)	64.03	64.15	62.17
Humedad (%)	63.45		

MUESTRA	AP1-M3 (3)		
Profundidad	0.00 - 1.00		
Tara No.	AA104	A149	A72
Suelo Hum+Tara (g)	43.90	50.03	55.01
Suelo Seco+Tara (g)	35.05	38.26	41.51
Tara (g)	20.30	19.29	19.59
Humedad (%)	60.00	62.05	61.59
Humedad (%)	61.21		

MUESTRA	AP1-M2 (1)		
Profundidad	0.00 - 1.00		
Tara No.	A141	A233	TE133
Suelo Hum+Tara (g)	41.10	47.50	55.85
Suelo Seco+Tara (g)	33.91	36.37	42.42
Tara (g)	22.68	19.24	22.46
Humedad (%)	64.02	64.97	67.28
Humedad (%)	65.43		

MUESTRA	AP1-M2 (2)		
Profundidad	0.00 - 1.00		
Tara No.	A11	A216	A164
Suelo Hum+Tara (g)	48.74	48.53	43.27
Suelo Seco+Tara (g)	36.97	37.21	34.06
Tara (g)	18.82	19.00	19.51
Humedad (%)	64.85	62.16	63.30
Humedad (%)	63.44		

MUESTRA	AP1-M2 (3)		
Profundidad	0.00 - 1.00		
Tara No.	A233	A215	A110
Suelo Hum+Tara (g)	59.44	54.22	61.80
Suelo Seco+Tara (g)	45.42	41.77	47.04
Tara (g)	19.01	21.37	23.85
Humedad (%)	53.09	61.03	63.65
Humedad (%)	59.25		

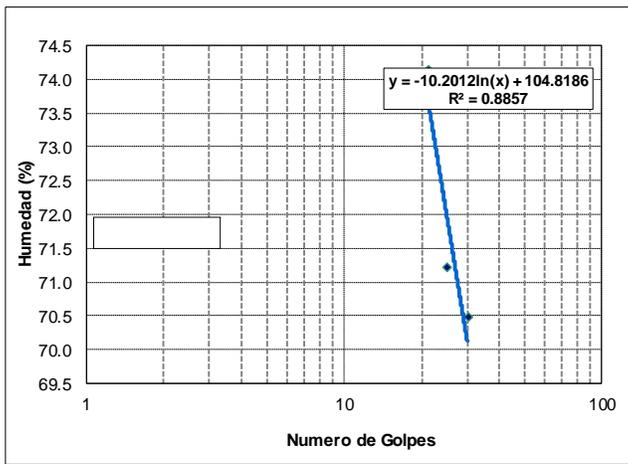
MUESTRA	AP1-M1 (1)		
Profundidad	0.00 - 1.00		
Tara No.	A215	A110	A70
Suelo Hum+Tara (g)	48.10	47.18	53.36
Suelo Seco+Tara (g)	37.05	36.23	39.92
Tara (g)	21.77	20.06	20.03
Humedad (%)	72.32	67.72	67.57
Humedad (%)	69.20		

MUESTRA	AP1-M1 (2)		
Profundidad	0.00 - 1.00		
Tara No.	A19	A79	A53
Suelo Hum+Tara (g)	47.08	52.41	54.42
Suelo Seco+Tara (g)	35.50	37.96	41.57
Tara (g)	18.55	18.04	22.62
Humedad (%)	68.32	72.54	67.81
Humedad (%)	69.56		

MUESTRA	AP1-M1 (3)		
Profundidad	0.00 - 1.00		
Tara No.	A24	A70	A151
Suelo Hum+Tara (g)	50.18	45.47	52.90
Suelo Seco+Tara (g)	36.63	36.32	40.18
Tara (g)	18.76	18.50	22.31
Humedad (%)	75.83	51.35	71.18
Humedad (%)	66.12		

Límites de consistencia: límite líquido y límite plástico

Datos Límite Líquido (LL)									
Golpes	30			25			21		
Tara No.	A208	A11	A38	A164	A240	A199	A163	A144	A75
Suelo Humedo + Tara (g)	27.81	27.93	28.16	30.78	26.62	26.46	29.46	27.50	26.56
Suelo Seco + Tara (g)	24.78	24.46	25.30	26.92	23.72	23.76	25.49	24.01	24.12
Tara (g)	20.68	19.43	21.13	21.47	19.66	19.98	20.21	19.22	20.84
Humedad (%)	73.90	68.99	68.59	70.83	71.43	71.43	75.19	72.86	74.39
Humedad (%)	70.49			71.23			74.15		



LL (%) 71.98

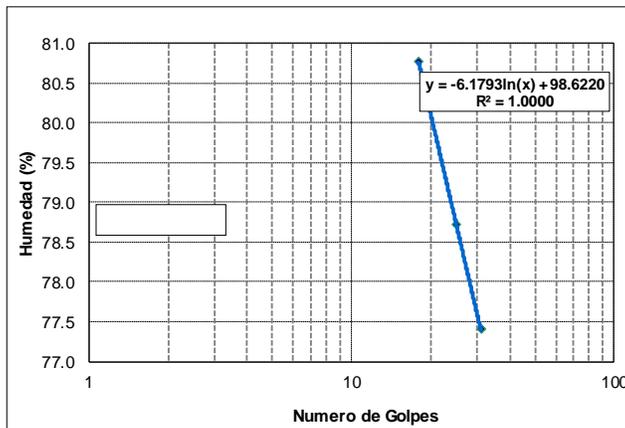
Datos Límite Plástico (LP)

Tara No.	K38	A177	A19
Suelo Humedo + Tara (g)	23.63	24.21	26.80
Suelo Seco + Tara (g)	22.05	22.39	24.96
Tara (g)	18.51	18.58	21.09
Humedad (%)	44.63	47.77	47.55

LP (%) 46.65

IP (%) 25.33

Datos Límite Líquido (LL)									
Golpes	31			25			18		
Tara No.	A139	A130	A134	A58	A173	A29	A143	A66	A160
Suelo Humedo + Tara (g)	24.99	27.26	26.90	28.11	27.35	28.11	25.50	29.49	27.12
Suelo Seco + Tara (g)	22.92	24.04	24.07	24.53	23.78	24.26	22.67	25.20	23.74
Tara (g)	20.18	14.79	20.50	19.88	19.21	19.51	19.34	19.56	19.58
Humedad (%)	75.55	34.81	79.27	76.99	78.12	81.05	84.98	76.06	81.25
Humedad (%)	77.41			78.72			80.77		



LL (%) 78.73

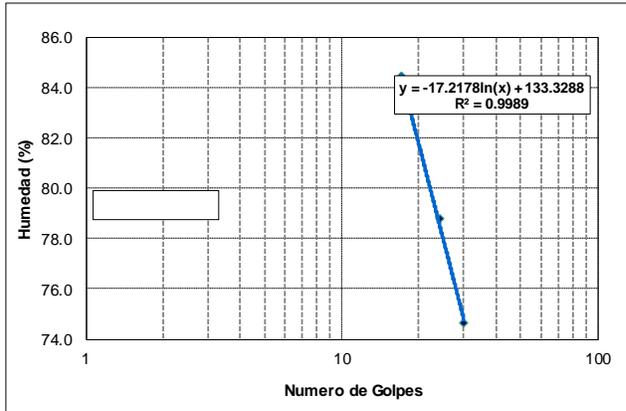
Datos Límite Plástico (LP)

Tara No.	A181	A79	A99
Suelo Humedo + Tara (g)	26.25	24.54	24.47
Suelo Seco + Tara (g)	24.18	22.72	22.54
Tara (g)	20.08	19.26	18.96
Humedad (%)	50.49	52.60	53.91

LP (%) 52.33

IP (%) 26.40

Datos Límite Líquido (LL)									
Golpes	30			24			17		
Tara No.	A72	A175	A191	A147	A216	A111	A170	A53	A217
Suelo Humedo + Tara (g)	26.17	31.10	26.75	28.28	26.91	27.45	25.05	25.55	26.50
Suelo Seco + Tara (g)	23.22	27.54	24.03	25.83	23.44	24.15	22.29	22.34	23.64
Tara (g)	19.16	22.80	20.46	22.68	18.93	20.11	19.03	18.58	20.21
Humedad (%)	72.66	75.11	76.19	77.78	76.94	81.68	84.66	85.37	83.38
Humedad (%)	74.65			78.80			84.47		



LL (%) 77.91

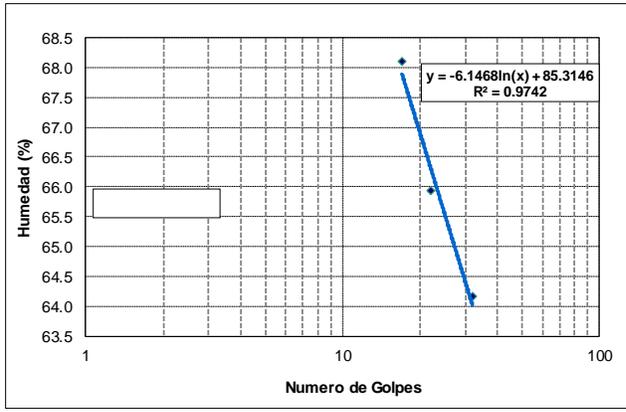
Datos Límite Plástico (LP)

Tara No.	A63	A67	A54
Suelo Humedo + Tara (g)	25.34	24.42	25.93
Suelo Seco + Tara (g)	23.55	22.45	23.39
Tara (g)	20.37	18.96	18.80
Humedad (%)	56.29	56.45	55.34

LP (%) 56.02

IP (%) 21.88

Datos Límite Líquido (LL)									
Golpes	32			22			17		
Tara No.	A283	A72	A149	A57	T9	A63	A189	A230	A27
Suelo Humedo + Tara (g)	26.49	29.39	27.94	28.00	33.61	26.81	26.28	27.26	27.58
Suelo Seco + Tara (g)	24.01	25.56	24.56	24.85	29.94	23.91	23.78	24.01	25.10
Tara (g)	20.14	19.60	19.29	20.07	24.37	19.52	20.09	19.25	21.47
Humedad (%)	64.08	64.26	64.14	65.90	65.89	66.06	67.75	68.28	68.32
Humedad (%)	64.16			65.95			68.12		



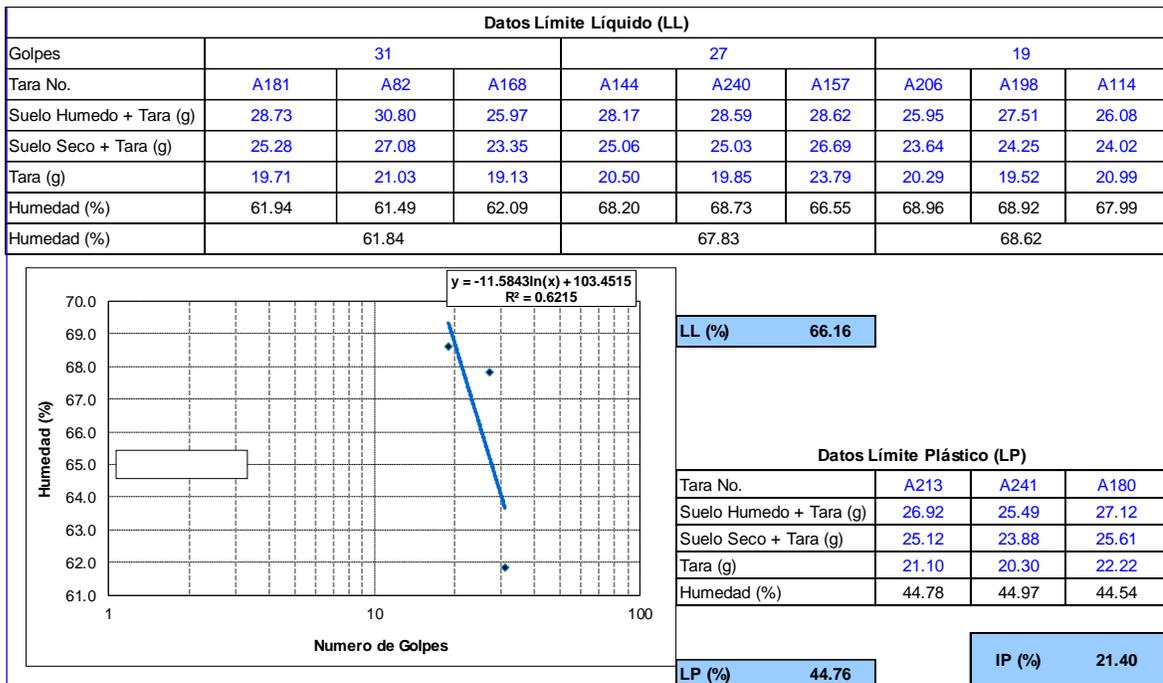
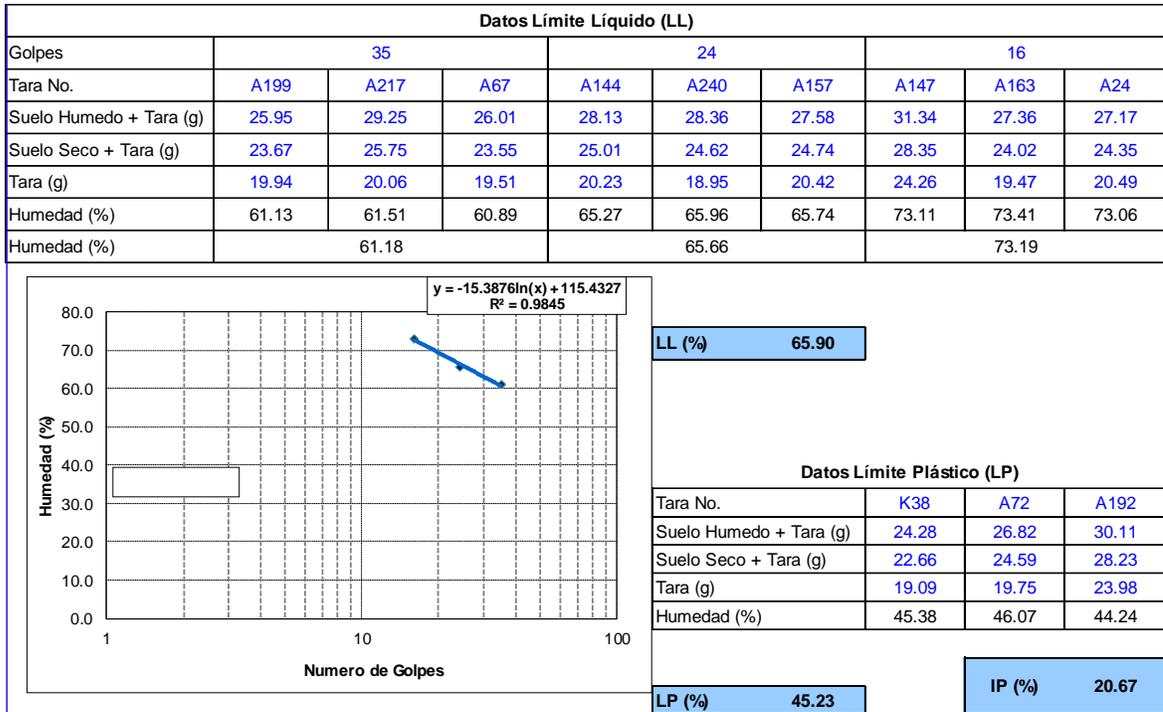
LL (%) 65.53

Datos Límite Plástico (LP)

Tara No.	A134	A38	A111
Suelo Humedo + Tara (g)	24.44	25.71	25.03
Suelo Seco + Tara (g)	22.66	24.05	23.70
Tara (g)	18.34	20.14	20.60
Humedad (%)	41.20	42.46	42.90

LP (%) 42.19

IP (%) 23.34



Límites de contracción

Tara	4		8		10	
Masa T (g)	15.95		15.97		15.3	
Diámetro T (mm)	40.73	40.69	40.54	40.48	41.08	41.07
	40.71		40.36		41.01	
	40.63		40.53		41.07	
Altura T (mm)	12.55	12.445	13.39	13.21	12.22	12.35
	12.34		13.03		12.48	
Masa T + Sh (g)	39.88		41.94		39.2	
Masa T + Ss (g)	30.75		32.03		30.09	
Masa Pastilla + parafina (g)	20.7		20.27		20.39	
Masa sumergida (g)	2.27		3.08		2.73	
Masa Ss (g)	14.8		16.06		14.79	
W (%)	61.69		61.71		61.60	
Vol Pastilla en parafina Vdx (cm3)	18.43		17.19		17.66	
Masa parafina Mx (g)	5.9		4.21		5.6	
Vol parafina Vx (cm3)	6.70		4.78		6.36	
Vol pastilla sin parafina Vd (cm3)	11.73		12.41		11.30	
Límite contracción	31.57		33.11		27.35	
R	1.3		1.3		1.3	

Ensayos Balanza Hidrostática

Muestra	Humedad muestra	Wt + anillo (gr)	Wanillo (gr)	Wt (gr)	Wtp (gr)	Wtp' (gr)	Vp (cm3)	Vs (cm3)
Anillo 3	4.4%	36.18	6.13	30.05	39.67	7.70	11.06	20.91
Anillo 2	5.1%	39.77	6.3	33.47	39.52	6.40	6.95	26.17
Anillo 26	58.0%	50.64	7.55	43.09	58.57	10.60	17.79	30.18
Anillo 1	59.9%	46.6	8.6	38.00	43.5	11.20	6.32	25.98
Anillo 5	61.1%	53.64	8.79	44.85	49.4	14.80	5.23	29.37
Anillo 34	66.6%	54.91	7.78	47.13	50.42	16.60	3.78	30.04
Anillo 34 2da tanda	53.5%	47.1	7.78	39.32	51.00	8.40	13.43	29.17
Anillo cero	45.0%	45.30	6.2	39.10	42.70	7.30	4.14	31.26
Anillo 5	39.0%	41.57	8.8	32.77	40.60	4.10	9.00	27.50
Anillo 6.35	22.9%	41.52	6.3	35.22	43.24	5.20	9.22	28.82

Ensayos de hidrómetro

HIDRÓMETRO 1 - AGUA												
Masa suelo húmedo (gr)	70.5	Hidrómetro 152H				Gravedad específica de sólidos		2.65	depende si es agua o defloculante depende si es agua o defloculante			
Humedad	59.5%					h (mm)		140				
Masa suelo seco al horno (gr)	44.20	Vb (mm ³)		67000	Viscosidad suspensión (g/cm.s)		0.00912					
%pasa tamiz #10	88.92	A (mm ²)		2780	K		0.01302					
Masa suelo seco para ensayo (gr)	39.30				γw (20°C) (g/cm ³)		0.99829					
					γw (T=24°C) (g/cm ³)		0.99738					
					Corrección por Temperatura Ct (Para T=24°C) (g/L)		1.30					
					α		2.50E-05					
					Corrección por Menisco Cm (g/L)		1					
					Factor de corrección por gravedad específica α		1.000					
deflo + agua												
Temperatura	Tiempo	Lectura Hidrómetro	Lectura corregida	Lectura del agente	Corrección por defloculante	Lectura corregida	Distancia cuello a R	Profundidad efectiva	Diámetro de las partículas	Porcentaje más Fino		
T (°C)	t (min)	R' (g/L)	R (g/L)	concentración (g/L)	Cd (g/L)	Rc (g/L)	Hr (mm)	L (mm)	D (mm)	PMF (%)		
24	0.25	25	26	7	9.3	18.00	62.36	120.31	0.09033	45.80		
24	0.50	25	26	7	9.3	18.00	62.36	120.31	0.06387	45.80		
24	1	25	26	7	9.3	18.00	62.36	120.31	0.04517	45.80		
24	2	23	24	7	9.3	16.00	65.64	123.59	0.03237	40.71		
24	4	22	23	7	9.3	15.00	67.28	125.23	0.02304	38.17		
24	5	22	23	7	9.3	15.00	67.28	125.23	0.02061	38.17		
24	10	21	22	7	9.3	14.00	68.92	126.87	0.01467	35.62		
24	15	21	22	7	9.3	14.00	68.92	126.87	0.01198	35.62		
24	30	13	14	7	9.3	6.00	82.04	139.99	0.00890	15.27		
24	60	2	3	7	9.3	-5.00	100.08	158.03	0.00668	-12.72		
24	120	0	1	7	9.3	-7.00	103.36	161.31	0.00477	-17.81		
24	240	0	1	7	9.3	-7.00	103.36	161.31	0.00338	-17.81		
24	480	0	1	7	9.3	-7.00	103.36	161.31	0.00239	-17.81		
24	1440	0	1	7	9.3	-7.00	103.36	161.31	0.00138	-17.81		

HIDRÓMETRO 1 - DEFLOCULANTE														
Masa suelo húmedo (gr)	70.37	Hidrómetro 152H				Gravedad específica de sólidos		2.65	depende si es agua o defloculante depende si es agua o defloculante					
Humedad	59.5%					h (mm)	140	Gravedad específica suspensión					1.00502	
Masa suelo seco al horno (gr)	44.12	Vb (mm ³)	67000	Viscosidad suspensión (g/cm.s)		0.00912								
%pasa tamiz #10	82.87	A (mm ²)	2780	K		0.01304								
Masa suelo seco para ensayo (gr)	36.57			γ _w (20°C) (g/cm ³)		0.99829								
							γ _w (T=24°C) (g/cm ³)						0.99738	
							Corrección por Temperatura Ct (Para T=24°C) (g/L)						1.30	
							α						2.50E-05	
							Corrección por Menisco Cm (g/L)						1	
							Factor de corrección por gravedad específica α						1.000	
deflo + agua														
Temperatura	Tiempo	Lectura Hidrómetro	Lectura corregida	Lectura del agente	Corrección por defloculante	Lectura corregida	Distancia cuello a R	Profundidad efectiva	Diámetro de las partículas	Porcentaje más Fino				
T (°C)	t (min)	R' (g/L)	R (g/L)	concentración (g/L)	Cd (g/L)	Rc (g/L)	Hr (mm)	L (mm)	D (mm)	PMF (%)				
24	0.25	33	34	7	9.3	26.00	49.24	107.19	0.08539	71.10				
24	0.50	33	34	7	9.3	26.00	49.24	107.19	0.06038	71.10				
24	1	33	34	7	9.3	26.00	49.24	107.19	0.04270	71.10				
24	2	32	33	7	9.3	25.00	50.88	108.83	0.03042	68.37				
24	4	31	32	7	9.3	24.00	52.52	110.47	0.02167	65.63				
24	5	31	32	7	9.3	24.00	52.52	110.47	0.01938	65.63				
24	10	31	32	7	9.3	24.00	52.52	110.47	0.01371	65.63				
24	15	31	32	7	9.3	24.00	52.52	110.47	0.01119	65.63				
24	30	30	31	7	9.3	23.00	54.16	112.11	0.00797	62.90				
24	60	29	30	7	9.3	22.00	55.80	113.75	0.00568	60.17				
24	120	27	28	7	9.3	20.00	59.08	117.03	0.00407	54.70				
24	240	25	26	7	9.3	18.00	62.36	120.31	0.00292	49.23				
24	480	24	25	7	9.3	17.00	64.00	121.95	0.00208	46.49				
24	1440	22	23	7	9.3	15.00	67.28	125.23	0.00122	41.02				

HIDRÓMETRO 1 - AGUA															
Masa suelo húmedo (gr)		75.3		Hidrómetro 152H				Gravedad específica de sólidos		2.65					
Humedad		59.5%		h (mm)		140		Gravedad específica suspensión		1					
Masa suelo seco al horno (gr)		47.21		Vb (mm3)		67000		Viscosidad suspensión (g/cm.s)		0.00912					
%pasa tamiz #10		85.38		A (mm2)		2780		K		0.01302					
Masa suelo seco para ensayo (gr)		40.31										γw (20°C) (g/cm3)		0.99829	
								γw (T=24°C) (g/cm3)		0.99738		<i>depende si es agua o defloculante</i>			
								Corrección por Temperatura Ct (Para T=24°C) (g/L)		1.30					
								α		2.50E-05		<i>depende si es agua o defloculante</i>			
								Corrección por Menisco Cm (g/L)		1					
								Factor de corrección por gravedad específica α		1.000					
deflo + agua															
Temperatura	Tiempo	Lectura Hidrómetro	Lectura corregida	Lectura del agente	Corrección por defloculante	Lectura corregida	Distancia cuello a R	Profundidad efectiva	Diámetro de las partículas	Porcentaje más Fino					
T (°C)	t (min)	R' (g/L)	R (g/L)	concentración (g/L)	Cd (g/L)	Rc (g/L)	Hr (mm)	L (mm)	D (mm)	PMF (%)					
24	0.25	27	28	7	9.3	20.00	59.08	117.03	0.08909	49.62					
24	0.50	27	28	7	9.3	20.00	59.08	117.03	0.06300	49.62					
24	1	25	26	7	9.3	18.00	62.36	120.31	0.04517	44.66					
24	2	24	25	7	9.3	17.00	64.00	121.95	0.03215	42.17					
24	4	23	24	7	9.3	16.00	65.64	123.59	0.02289	39.69					
24	5	23	24	7	9.3	16.00	65.64	123.59	0.02047	39.69					
24	10	21	22	7	9.3	14.00	68.92	126.87	0.01467	34.73					
24	15	18	19	7	9.3	11.00	73.84	131.79	0.01221	27.29					
24	30	9	10	7	9.3	2.00	88.60	146.55	0.00910	4.96					
24	60	7	8	7	9.3	0.00	91.88	149.83	0.00651	0.00					
24	120	7	8	7	9.3	0.00	91.88	149.83	0.00460	0.00					
24	240	5	6	7	9.3	-2.00	95.16	153.11	0.00329	-4.96					
24	480	5	6	7	9.3	-2.00	95.16	153.11	0.00233	-4.96					
24	1440	5	6	7	9.3	-2.00	95.16	153.11	0.00134	-4.96					

HIDRÓMETRO 1 - DEFLOCULANTE														
Masa suelo húmedo (gr)	71.04	Hidrómetro 152H				Gravedad específica de sólidos		2.65	depende si es agua o defloculante depende si es agua o defloculante					
Humedad	59.5%					h (mm)	140	Gravedad específica suspensión					1.00502	
Masa suelo seco al horno (gr)	44.54	Vb (mm ³)	67000	Viscosidad suspensión (g/cm.s)		0.00912								
%pasa tamiz #10	78.69	A (mm ²)	2780	K		0.01304								
Masa suelo seco para ensayo (gr)	35.05			γ _w (20°C) (g/cm ³)		0.99829								
							γ _w (T=24°C) (g/cm ³)						0.99738	
							Corrección por Temperatura Ct (Para T=24°C) (g/L)						1.30	
							α						2.50E-05	
							Corrección por Menisco Cm (g/L)						1	
							Factor de corrección por gravedad específica α						1.000	
deflo + agua														
Temperatura	Tiempo	Lectura Hidrómetro	Lectura corregida	Lectura del agente	Corrección por defloculante	Lectura corregida	Distancia cuello a R	Profundidad efectiva	Diámetro de las partículas	Porcentaje más Fino				
T (°C)	t (min)	R' (g/L)	R (g/L)	concentración (g/L)	Cd (g/L)	Rc (g/L)	Hr (mm)	L (mm)	D (mm)	PMF (%)				
24	0.25	34	35	7	9.3	27.00	47.60	105.55	0.08474	77.03				
24	0.50	34	35	7	9.3	27.00	47.60	105.55	0.05992	77.03				
24	1	33	34	7	9.3	26.00	49.24	107.19	0.04270	74.18				
24	2	32	33	7	9.3	25.00	50.88	108.83	0.03042	71.32				
24	4	31	32	7	9.3	24.00	52.52	110.47	0.02167	68.47				
24	5	31	32	7	9.3	24.00	52.52	110.47	0.01938	68.47				
24	10	30	31	7	9.3	23.00	54.16	112.11	0.01381	65.62				
24	15	30	31	7	9.3	23.00	54.16	112.11	0.01127	65.62				
24	30	28	29	7	9.3	21.00	57.44	115.39	0.00809	59.91				
24	60	27	28	7	9.3	20.00	59.08	117.03	0.00576	57.06				
24	120	25	26	7	9.3	18.00	62.36	120.31	0.00413	51.35				
24	240	24	25	7	9.3	17.00	64.00	121.95	0.00294	48.50				
24	480	23	24	7	9.3	16.00	65.64	123.59	0.00209	45.65				
24	1440	22	23	7	9.3	15.00	67.28	125.23	0.00122	42.79				

HIDRÓMETRO 1 - AGUA											
Masa suelo húmedo (gr)		73.23		Hidrómetro 152H				Gravedad específica de sólidos		2.65	
Humedad		59.5%		h (mm)		140		Gravedad específica suspensión		1	
Masa suelo seco al horno (gr)		45.91		Vb (mm3)		67000		Viscosidad suspensión (g/cm.s)		0.01600	
%pasa tamiz #10		85.42		A (mm2)		2780		K		0.01724	
Masa suelo seco para ensayo (gr)		39.22									
								γ_w (20°C) (g/cm3)		0.99829	
								γ_w (T=24°C) (g/cm3)		0.99738	
								Corrección por Temperatura Ct (Para T=24°C) (g/L)		2.26	
								α		2.50E-05	
								Corrección por Menisco Cm (g/L)		1	
								Factor de corrección por gravedad específica α		1.000	
deflo + agua											
Temperatura	Tiempo	Lectura Hidrómetro	Lectura corregida	Lectura del agente	Corrección por defloculante	Lectura corregida	Distancia cuello a R	Profundidad efectiva	Diámetro de las partículas	Porcentaje más Fino	
T (°C)	t (min)	R' (g/L)	R (g/L)	concentración (g/L)	Cd (g/L)	Rc (g/L)	Hr (mm)	L (mm)	D (mm)	PMF (%)	
24	1	25	26	7	10.3	18.00	62.36	120.31	0.05981	45.90	
24	2	24	25	7	10.3	17.00	64.00	121.95	0.04258	43.35	
24	4	23	24	7	10.3	16.00	65.64	123.59	0.03031	40.80	
24	5	23	24	7	10.3	16.00	65.64	123.59	0.02711	40.80	
24	10	21	22	7	10.3	14.00	68.92	126.87	0.01942	35.70	
24	15	15	16	7	10.3	8.00	78.76	136.71	0.01646	20.40	
24	30	7	8	7	10.3	0.00	91.88	149.83	0.01219	0.00	
24	60	6	7	7	10.3	-1.00	93.52	151.47	0.00866	-2.55	
24	120	6	7	7	10.3	-1.00	93.52	151.47	0.00613	-2.55	
24	240	6	7	7	10.3	-1.00	93.52	151.47	0.00433	-2.55	
24	480	6	7	7	10.3	-1.00	93.52	151.47	0.00306	-2.55	
24	1440	6	7	7	10.3	-1.00	93.52	151.47	0.00177	-2.55	

depende si es agua o defloculante
depende si es agua o defloculante

HIDRÓMETRO 1 - DEFLOCULANTE											
Masa suelo húmedo (gr)	70.64	Hidrómetro 152H				Gravedad específica de sólidos		2.65	<i>depende si es agua o defloculante</i>		
Humedad	59.5%					h (mm)	140	Gravedad específica suspensión			
Masa suelo seco al horno (gr)	44.29	Vb (mm ³)	67000	Viscosidad suspensión (g/cm.s)		0.01600					
%pasa tamiz #10	88.08	A (mm ²)	2780	K		0.01723					
Masa suelo seco para ensayo (gr)	39.01			γ _w (20°C) (g/cm ³)		0.99829					
				γ _w (T=24°C) (g/cm ³)		0.99738					
				Corrección por Temperatura Ct (Para T=24°C) (g/L)		2.26					
				α		2.50E-05					
				Corrección por Menisco Cm (g/L)		1					
				Factor de corrección por gravedad específica α		1.000					
deflo + agua											
Temperatura	Tiempo	Lectura Hidrómetro	Lectura corregida	Lectura del agente	Corrección por defloculante	Lectura corregida	Distancia cuello a R	Profundidad efectiva	Diámetro de las partículas	Porcentaje más Fino	
T (°C)	t (min)	R' (g/L)	R (g/L)	concentración (g/L)	Cd (g/L)	Rc (g/L)	Hr (mm)	L (mm)	D (mm)	PMF (%)	
24	1	33	34	7	10.3	26.00	49.24	107.19	0.05642	66.65	
24	2	32	33	7	10.3	25.00	50.88	108.83	0.04020	64.09	
24	4	31	32	7	10.3	24.00	52.52	110.47	0.02864	61.52	
24	5	31	32	7	10.3	24.00	52.52	110.47	0.02561	61.52	
24	10	30	31	7	10.3	23.00	54.16	112.11	0.01825	58.96	
24	15	29	30	7	10.3	22.00	55.80	113.75	0.01501	56.40	
24	30	28	29	7	10.3	21.00	57.44	115.39	0.01069	53.83	
24	60	27	28	7	10.3	20.00	59.08	117.03	0.00761	51.27	
24	120	26	27	7	10.3	19.00	60.72	118.67	0.00542	48.71	
24	240	24	25	7	10.3	17.00	64.00	121.95	0.00388	43.58	
24	480	24	25	7	10.3	17.00	64.00	121.95	0.00275	43.58	
24	1440	22	23	7	10.3	15.00	67.28	125.23	0.00161	38.45	

Suelo erosionado en la parcela de campo

HIDRÓMETRO 1 - AGUA													
Masa suelo húmedo (gr)		70.02		Hidrómetro 152H				Gravedad específica de sólidos		2.65			
Humedad		59.5%		h (mm)		140		Gravedad específica suspensión		1			
Masa suelo seco al horno (gr)		43.90		Vb (mm3)		67000		Viscosidad suspensión (g/cm.s)		0.00902			
%pasa tamiz #10		100.00		A (mm2)		2780		K		0.01295			
Masa suelo seco para ensayo (gr)		43.90										<i>depende si es agua o defloculante</i>	
								γw (20°C) (g/cm3)		0.99829		<i>depende si es agua o defloculante</i>	
								γw (T=24°C) (g/cm3)		0.99738			
								Corrección por Temperatura Ct (Para T=24°C) (g/L)		1.28			
								α		2.50E-05			
								Corrección por Menisco Cm (g/L)		1			
								Factor de corrección por gravedad específica α		1.000			
Temperatura	Tiempo	Lectura Hidrómetro	Lectura corregida	Lectura del agente	Corrección por defloculante	Lectura corregida	Distancia cuello a R	Profundidad efectiva	Diámetro de las partículas	Porcentaje más Fino			
T (°C)	t (min)	R' (g/L)	R (g/L)	concentración (g/L)	Cd (g/L)	Rc (g/L)	Hr (mm)	L (mm)	D (mm)	PMF (%)			
24.5	0.25	17	18	6	8.3	11.00	75.48	133.43	0.09458	25.06			
24.5	0.50	16	17	6	8.3	10.00	77.12	135.07	0.06728	22.78			
24.5	1	14	15	6	8.3	8.00	80.40	138.35	0.04815	18.22			
24.5	2	11	12	6	8.3	5.00	85.32	143.27	0.03465	11.39			
24.5	5	10	11	6	8.3	4.00	86.96	144.91	0.02204	9.11			
24.5	10	7	8	6	8.3	1.00	91.88	149.83	0.01585	2.28			
25	15	7	8	6	8.3	1.00	91.88	149.83	0.01294	2.28			
25	30	7	8	6	8.3	1.00	91.88	149.83	0.00915	2.28			
25	60	6	7	6	8.3	0.00	93.52	151.47	0.00650	0.00			
25	120	5	6	6	8.3	-1.00	95.16	153.11	0.00462	-2.28			
25	250	4	5	6	8.3	-2.00	96.80	154.75	0.00322	-4.56			
24	1440	4	5	6	8.3	-2.00	96.80	154.75	0.00134	-4.56			

HIDRÓMETRO 1 - AGUA													
Masa suelo húmedo (gr)	70.09	Hidrómetro 152H				Gravedad específica de sólidos		2.65	depende si es agua o defloculante depende si es agua o defloculante				
Humedad	59.5%					h (mm)		140					Gravedad específica suspensión
Masa suelo seco al horno (gr)	43.94	Vb (mm ³)		67000	Viscosidad suspensión (g/cm.s)		0.00891						
%pasa tamiz #10	100.00	A (mm ²)		2780	K		0.01287						
Masa suelo seco para ensayo (gr)	43.94						γ _w (20°C) (g/cm ³)						0.99829
							γ _w (T=24°C) (g/cm ³)						0.99738
							Corrección por Temperatura Ct (Para T=24°C) (g/L)						1.26
							α						2.50E-05
							Corrección por Menisco Cm (g/L)						1
							Factor de corrección por gravedad específica α						1.000
deflo + agua													
Temperatura	Tiempo	Lectura Hidrómetro	Lectura corregida	Lectura del agente	Corrección por defloculante	Lectura corregida	Distancia cuello a R	Profundidad efectiva	Diámetro de las partículas	Porcentaje más Fino			
T (°C)	t (min)	R' (g/L)	R (g/L)	concentración (g/L)	Cd (g/L)	Rc (g/L)	Hr (mm)	L (mm)	D (mm)	PMF (%)			
25	0.25	25	26	6	8.3	19.00	62.36	120.31	0.08928	43.24			
25	0.50	23	24	6	8.3	17.00	65.64	123.59	0.06399	38.69			
25	1	15	16	6	8.3	9.00	78.76	136.71	0.04759	20.48			
25	2	12	13	6	8.3	6.00	83.68	141.63	0.03425	13.65			
25	5	7	8	6	8.3	1.00	91.88	149.83	0.02228	2.28			
25	10	7	8	6	8.3	1.00	91.88	149.83	0.01575	2.28			
25	15	6	7	6	8.3	0.00	93.52	151.47	0.01293	0.00			
25	30	6	7	6	8.3	0.00	93.52	151.47	0.00915	0.00			
25	60	5	6	6	8.3	-1.00	95.16	153.11	0.00650	-2.28			
25	120	5	6	6	8.3	-1.00	95.16	153.11	0.00460	-2.28			
25	250	5	6	6	8.3	-1.00	95.16	153.11	0.00319	-2.28			
24	1440	5	6	6	8.3	-1.00	95.16	153.11	0.00133	-2.28			

HIDRÓMETRO 1 - AGUA

Masa suelo húmedo (gr)	68.44
Humedad	59.5%
Masa suelo seco al horno (gr)	42.91
%pasa tamiz #10	100.00
Masa suelo seco para ensayo (gr)	42.91

Hidrómetro 152H	
h (mm)	140
Vb (mm ³)	67000
A (mm ²)	2780

Gravedad específica de sólidos	2.65
Gravedad específica suspensión	1
Viscosidad suspensión (g/cm.s)	0.00891
K	0.01287
γ_w (20°C) (g/cm ³)	0.99829
γ_w (T=24°C) (g/cm ³)	0.99738
Corrección por Temperatura Ct (Para T=24°C) (g/L)	1.26
α	2.50E-05
Corrección por Menisco Cm (g/L)	1
Factor de corrección por gravedad específica α	1.000

depende si es agua o defloculante
depende si es agua o defloculante

Temperatura	Tiempo	Lectura Hidrómetro	Lectura corregida	Lectura del agente	Corrección por defloculante	Lectura corregida	Distancia cuello a R	Profundidad efectiva	Diámetro de las partículas	Porcentaje más Fino
T (°C)	t (min)	R' (g/L)	R (g/L)	concentración (g/L)	Cd (g/L)	Rc (g/L)	Hr (mm)	L (mm)	D (mm)	PMF (%)
25	0.25	17	18	6	8.3	11.00	75.48	133.43	0.09402	25.64
25	0.50	15	16	6	8.3	9.00	78.76	136.71	0.06730	20.97
25	1	14	15	6	8.3	8.00	80.40	138.35	0.04787	18.64
25	2	12	13	6	8.3	6.00	83.68	141.63	0.03425	13.98
25	5	10	11	6	8.3	4.00	86.96	144.91	0.02191	9.32
25	10	7	8	6	8.3	1.00	91.88	149.83	0.01575	2.33
25	15	6	7	6	8.3	0.00	93.52	151.47	0.01293	0.00
25	30	6	7	6	8.3	0.00	93.52	151.47	0.00915	0.00
25	60	5	6	6	8.3	-1.00	95.16	153.11	0.00650	-2.33
25	120	5	6	6	8.3	-1.00	95.16	153.11	0.00460	-2.33
25	250	4	5	6	8.3	-2.00	96.80	154.75	0.00320	-4.66
24	1440	4	5	6	8.3	-2.00	96.80	154.75	0.00133	-4.66

Ensayos de permeabilidad

Permeabilidad 1

Datos de entrada	
dtubo (mm)	5.31
Área (mm ²)	22.15
d muestra (mm)	24.85
Área (mm ²)	485.00
Long muestra (mm)	45.99

tiempos (seg)	0	51	118	209	340
h	60	50	40	30	20

	T1	T2	T3	T4
Intervalos	51	67	91	131

	K1 (cm/s)	K2 (cm/s)	K3 (cm/s)	K4 (cm/s)
Permeabilidad	7.51E-04	6.99E-04	6.64E-04	6.50E-04

Permeabilidad 2

Datos de entrada	
dtubo (mm)	5.31
Área (mm ²)	22.15
d muestra (mm)	27.09
Área (mm ²)	576.38
Long muestra (mm)	45.99

tiempos (seg)	0	425	1098	1854	5220
h	85	84	83	82	78

	T1	T2	T3	T4
Intervalos	425	673	756	3366

	K1 (cm/s)	K2 (cm/s)	K3 (cm/s)	K4 (cm/s)
Permeabilidad	4.92E-06	3.14E-06	2.83E-06	2.63E-06

Permeabilidad 3

Datos de entrada	
dtubo (mm)	5.31
Área (mm ²)	22.15
d muestra (mm)	25.55
Área (mm ²)	512.71
Long muestra (mm)	45.99

tiempos (seg)	0	44	94	169	279
h	60	50	40	30	20

	T1	T2	T3	T4
Intervalos	44	50	75	110

	K1 (cm/s)	K2 (cm/s)	K3 (cm/s)	K4 (cm/s)
Permeabilidad	8.23E-04	8.87E-04	7.62E-04	7.32E-04

Ensayos de gravedad específica

Ws	Whigroscopica	Corrección por humedad	Wbw	Wbws	T(°)	$\gamma_w T^\circ$ (kg/m3)
Peso sólidos (gr)	%	Peso sólidos (gr)	Peso picnómetro + agua (gr)	Peso picnómetro + agua llenado (gr)	Temperatura	Peso unitario agua a una T°
61.33	4.29	58.81	668.18	704.61	22.5	997.74
60.52		58.03	668.18	704.69	22.5	997.74
51.62		49.50	668.18	698.91	22.5	997.74

$\gamma_w 4^\circ\text{C}$ (kg/m3)	Gt	Gs	wprom (%)	$\gamma_{\text{sólidos}}$ (kN/m3)
Peso unitaria agua a 4°C	Gs del agua a la temperatura	Gs suelo	Humedad natural	
1000	0.99774	2.622	61.89	25.70
1000	0.99774	2.691		26.37
1000	0.99774	2.632		25.79

Ensayos de corte directo – Condición saturada

CORTE DIRECTO										
Saturado - Espéccimen A										
Diámetro (cm)	5.01	Área (cm²)	19.68	Carga (kN)	0.12					
				Esfuerzo (kPa)	60.000					
CONSOLIDACIÓN			CORTES DIRECTOS							
Tiempo	t (h)	t (min)	\sqrt{t} (min)	δ (mm)	Tiempo	Cortante (kN)	δ horizontal (mm)	δ vertical (mm)	δ axial (%)	Cortante (kPa)
00:00:00	0.00	0.00	0.00	0.000	00:00:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
00:00:01	0.00	0.02	0.13	1.388	00:02:00	0.004	0.041	-0.006	0.082	2.234
00:00:02	0.00	0.03	0.18	1.421	00:04:00	0.002	0.157	0.000	0.314	1.117
00:00:03	0.00	0.05	0.22	1.433	00:06:00	0.001	0.151	0.000	0.301	0.745
00:00:04	0.00	0.07	0.26	1.440	00:08:00	0.007	0.157	0.000	0.314	3.351
00:00:05	0.00	0.08	0.29	1.445	00:10:01	0.029	0.376	0.013	0.752	14.521
00:00:06	0.00	0.10	0.32	1.451	00:12:01	0.042	0.623	0.037	1.244	21.223
00:00:12	0.00	0.20	0.45	1.466	00:14:01	0.048	0.814	0.059	1.626	24.574
00:00:15	0.00	0.25	0.50	1.471	00:16:01	0.056	0.992	0.078	1.992	28.669
00:00:30	0.01	0.50	0.71	1.484	00:18:01	0.061	1.184	0.096	2.364	30.903
00:01:00	0.02	1.00	1.00	1.503	00:20:01	0.065	1.375	0.109	2.747	33.137
00:02:01	0.03	2.02	1.42	1.517	00:22:01	0.069	1.533	0.126	3.061	34.999
00:05:01	0.08	5.02	2.24	1.532	00:24:01	0.073	1.717	0.135	3.430	36.860
00:10:01	0.17	10.02	3.16	1.541	00:26:01	0.075	1.909	0.146	3.813	38.350
00:20:01	0.33	20.02	4.47	1.558	00:28:02	0.076	2.107	0.153	4.210	38.722
00:40:03	0.67	40.05	6.33	1.562	00:30:02	0.078	2.306	0.159	4.606	39.467
01:00:04	1.00	60.07	7.75	1.571	00:32:02	0.078	2.497	0.162	4.989	39.839
01:30:05	1.50	90.08	9.49	1.571	00:34:02	0.080	2.689	0.166	5.371	40.584
02:00:07	2.00	120.12	10.96	1.575	00:36:02	0.081	2.887	0.172	5.768	40.956
02:30:09	2.50	150.15	12.25	1.582	00:38:02	0.081	3.086	0.179	6.164	41.328
03:00:10	3.00	180.17	13.42	1.578	00:40:02	0.083	3.277	0.186	6.547	42.073
03:30:12	3.50	210.20	14.50	1.580	00:42:02	0.084	3.482	0.194	6.957	42.445
04:00:13	4.00	240.22	15.50	1.582	00:44:02	0.084	3.681	0.196	7.353	42.445
04:30:15	4.50	270.25	16.44	1.588	00:46:03	0.083	3.879	0.198	7.749	42.073
05:00:17	5.00	300.28	17.33	1.582	00:48:03	0.084	4.078	0.199	8.146	42.445
30:00:59	6.02	360.98	19.00	1.591	00:50:03	0.084	4.276	0.201	8.542	42.818
36:00:00	12.00	720.00	26.83	1.604	00:52:03	0.085	4.475	0.205	8.938	43.190
					00:54:03	0.085	4.673	0.210	9.335	43.190
					00:56:03	0.086	4.865	0.216	9.717	43.562
					00:58:03	0.084	5.063	0.227	10.114	42.818
					01:00:03	0.085	5.261	0.233	10.510	43.190
					01:02:03	0.085	5.453	0.236	10.893	43.190
					01:04:04	0.085	5.658	0.240	11.303	43.190
					01:06:04	0.085	5.857	0.246	11.699	43.190
					01:08:04	0.086	6.055	0.244	12.096	43.935
					01:10:04	0.086	6.247	0.249	12.478	43.935
					01:12:04	0.086	6.445	0.255	12.875	43.935
					01:14:04	0.086	6.643	0.262	13.271	43.935
					01:16:04	0.085	6.849	0.266	13.681	43.190
					01:18:04	0.085	7.040	0.271	14.064	43.190
					01:20:04	0.085	7.245	0.279	14.474	43.190
					01:22:04	0.084	7.444	0.286	14.870	42.818
					01:22:44	0.084	7.505	0.288	14.993	42.818

Consolidación

OP	1.700
OQ	1.955
S90	1.520
T90	3.822
T50	0.893
df (mm)	2.503
tf (min)	44.650
Vel (mm/min)	0.056

Envolvente de Falla

τ Máx. (kPa)	43.93
δ_h Máx. (mm)	7.51

CORTE DIRECTO										
Saturado - Espécimen B										
Diámetro (cm)	5.01	Área (cm²)	19.68	Carga (kN)	0.24					
				Esfuerzo (kPa)	120.000					
CONSOLIDACIÓN				CORTES DIRECTOS						
Tiempo	t (h)	t (min)	√ t (min)	δ (mm)	Tiempo	Cortante (kN)	δ horizontal (mm)	δ vertical (mm)	δ axial (%)	Cortante (kPa)
00:00:00	0.00	0.00	0.00	0.000	00:00:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
00:00:01	0.00	0.02	0.13	1.560	00:02:00	0.041	0.041	0.009	0.082	20.850
00:00:02	0.00	0.03	0.18	1.571	00:04:00	0.041	0.041	0.009	0.082	20.850
00:00:03	0.00	0.05	0.22	1.582	00:06:00	0.045	0.062	0.011	0.123	23.084
00:00:04	0.00	0.07	0.26	1.593	00:08:00	0.045	0.062	0.011	0.123	22.712
00:00:05	0.00	0.08	0.29	1.604	00:10:01	0.043	0.157	0.018	0.314	21.967
00:00:06	0.00	0.10	0.32	1.615	00:12:01	0.062	0.226	0.028	0.451	31.276
00:00:12	0.00	0.20	0.45	1.626	00:14:01	0.079	0.417	0.065	0.834	40.211
00:00:15	0.00	0.25	0.50	1.637	00:16:01	0.089	0.602	0.100	1.203	45.424
00:00:30	0.01	0.50	0.71	1.648	00:18:01	0.095	0.794	0.129	1.585	48.403
00:01:00	0.02	1.00	1.00	1.722	00:20:01	0.105	0.978	0.153	1.954	53.243
00:02:00	0.03	2.00	1.41	1.788	00:22:01	0.108	1.170	0.179	2.337	55.104
00:05:00	0.08	5.00	2.24	1.816	00:24:01	0.117	1.348	0.203	2.692	59.572
00:10:00	0.17	10.00	3.16	1.836	00:26:01	0.122	1.533	0.249	3.061	62.179
00:20:01	0.33	20.02	4.47	1.858	00:28:02	0.128	1.710	0.286	3.417	65.157
00:40:02	0.67	40.03	6.33	1.860	00:30:02	0.134	1.895	0.323	3.786	68.136
01:00:03	1.00	60.05	7.75	1.873	00:32:02	0.136	2.087	0.354	4.169	69.253
01:30:05	1.50	90.08	9.49	1.871	00:34:02	0.141	2.278	0.382	4.551	71.487
02:00:06	2.00	120.10	10.96	1.877	00:36:02	0.147	2.463	0.414	4.920	74.466
02:30:08	2.50	150.13	12.25	1.879	00:38:02	0.148	2.655	0.445	5.303	75.210
03:00:10	3.00	180.17	13.42	1.886	00:40:02	0.151	2.846	0.480	5.686	76.700
03:30:11	3.50	210.18	14.50	1.882	00:42:02	0.156	3.031	0.500	6.055	79.306
04:00:13	4.00	240.22	15.50	1.882	00:44:02	0.160	3.222	0.524	6.437	81.540
04:30:15	4.50	270.25	16.44	1.890	00:46:03	0.164	3.421	0.552	6.834	83.401
05:00:16	5.00	300.27	17.33	1.895	00:48:03	0.166	3.558	0.582	7.107	84.146
09:00:29	9.01	540.48	23.25	1.901	00:50:03	0.171	3.749	0.600	7.490	86.752
20:51:07	20.85	1251.12	35.37	1.914	00:52:03	0.172	3.941	0.624	7.872	87.497
					00:54:03	0.174	4.139	0.642	8.269	88.242
					00:56:03	0.177	4.338	0.650	8.665	89.731
					00:58:03	0.178	4.529	0.665	9.048	90.476
					01:00:03	0.180	4.728	0.679	9.444	91.220
					01:02:03	0.181	4.919	0.692	9.827	91.965
					01:04:04	0.182	5.118	0.707	10.223	92.710
					01:06:04	0.182	5.323	0.718	10.633	92.710
					01:08:04	0.183	5.521	0.729	11.029	93.082
					01:10:04	0.182	5.720	0.740	11.426	92.710
					01:12:04	0.182	5.918	0.753	11.822	92.710
					01:14:04	0.183	6.117	0.768	12.219	93.082
					01:16:04	0.183	6.322	0.783	12.629	93.082
					01:18:04	0.183	6.527	0.797	13.039	93.082
					01:20:04	0.182	6.726	0.812	13.435	92.710
					01:22:04	0.182	6.931	0.827	13.845	92.337
					01:24:05	0.179	7.129	0.847	14.241	90.848
					01:26:05	0.177	7.334	0.866	14.651	90.103
					01:28:05	0.176	7.540	0.882	15.061	89.359
					01:30:05	0.174	7.738	0.899	15.458	88.614
					01:32:05	0.172	7.943	0.921	15.868	87.497
					01:34:05	0.170	8.142	0.945	16.264	86.380
					01:36:05	0.168	8.347	0.971	16.674	85.263
					01:37:45	0.168	8.518	0.991	17.016	85.263

Consolidación

OP	3.500
OQ	4.025
S90	1.840
T90	16.201
T50	3.785
df (mm)	2.503
tf (min)	189.260
Vel (mm/min)	0.013

τ Máx. (kPa)	93.08
δh Máx. (mm)	8.52

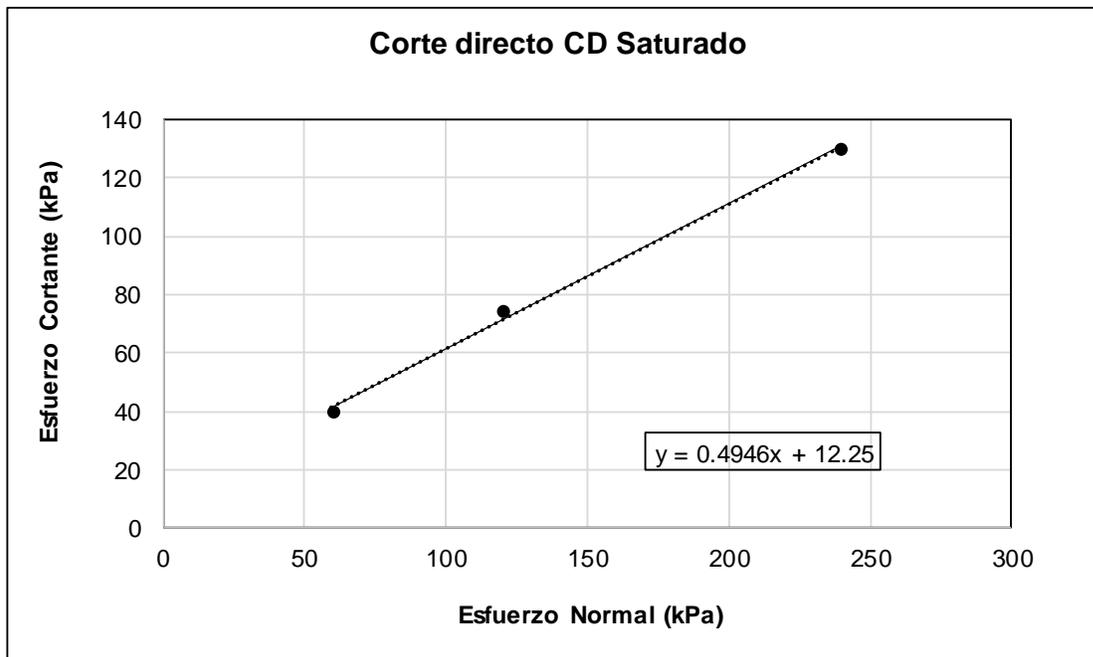
CORTE DIRECTO										
Saturado - Espécimen C										
Diámetro (cm)	5.01	Área (cm²)	19.68	Carga (kN)	0.47					
				Esfuerzo (kPa)	240.000					
CONSOLIDACIÓN			CORTES DIRECTOS							
Tiempo	t (h)	t (min)	\sqrt{t} (min)	δ (mm)	Tiempo	Cortante (kN)	δ horizontal (mm)	δ vertical (mm)	δ axial (%)	Cortante (kPa)
00:00:00	0.00	0.00	0.00	0.000	00:00:00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00
00:00:00	0.00	0.00	0.00	0.002	00:02:00	0.045	0.07	0.022	0.14	23.08
00:00:01	0.00	0.02	0.13	2.813	00:04:00	0.099	0.21	0.048	0.41	50.26
00:00:02	0.00	0.03	0.18	2.874	00:06:00	0.125	0.39	0.085	0.78	63.30
00:00:03	0.00	0.05	0.22	2.911	00:08:00	0.150	0.58	0.109	1.15	76.33
00:00:04	0.00	0.07	0.26	2.939	00:10:01	0.168	0.77	0.142	1.53	85.26
00:00:05	0.00	0.08	0.29	2.954	00:12:01	0.185	0.96	0.164	1.91	93.83
00:00:11	0.00	0.18	0.43	3.000	00:14:01	0.199	1.14	0.179	2.28	100.90
00:00:14	0.00	0.23	0.48	3.011	00:16:01	0.210	1.34	0.209	2.68	106.86
00:00:29	0.01	0.48	0.70	3.035	00:18:01	0.221	1.53	0.227	3.06	112.44
00:00:59	0.02	0.98	0.99	3.050	00:20:01	0.232	1.72	0.240	3.44	118.03
00:02:00	0.03	2.00	1.41	3.059	00:22:01	0.239	1.93	0.255	3.85	121.38
00:05:00	0.08	5.00	2.24	3.079	00:24:01	0.246	2.13	0.266	4.25	125.10
00:10:00	0.17	10.00	3.16	3.083	00:26:01	0.251	2.33	0.275	4.65	127.71
00:20:01	0.33	20.02	4.47	3.098	00:28:02	0.254	2.53	0.286	5.04	129.20
00:40:02	0.67	40.03	6.33	3.101	00:30:02	0.256	2.72	0.294	5.44	130.31
01:00:03	1.00	60.05	7.75	3.107	00:32:02	0.257	2.92	0.308	5.84	130.69
01:30:04	1.50	90.07	9.49	3.111	00:34:02	0.262	3.12	0.312	6.23	132.92
02:00:06	2.00	120.10	10.96	3.112	00:36:02	0.265	3.32	0.329	6.63	134.41
02:30:08	2.50	150.13	12.25	3.116	00:38:02	0.266	3.52	0.336	7.03	135.15
03:00:09	3.00	180.15	13.42	3.116	00:40:02	0.267	3.72	0.343	7.42	135.53
03:30:11	3.50	210.18	14.50	3.118	00:42:02	0.267	3.91	0.342	7.82	135.53
04:00:12	4.00	240.20	15.50	3.120	00:44:02	0.265	4.11	0.347	8.20	134.78
04:30:14	4.50	270.23	16.44	3.125	00:46:03	0.262	4.30	0.358	8.60	133.29
05:00:16	5.00	300.27	17.33	3.122	00:48:03	0.261	4.50	0.358	8.99	132.55
09:00:29	9.01	540.48	23.25	3.131	00:50:03	0.256	4.70	0.366	9.39	130.31
16:40:59	16.68	1000.98	31.64	3.131	00:52:03	0.255	4.90	0.375	9.79	129.57
					00:54:03	0.251	5.10	0.391	10.18	127.71
					00:56:03	0.254	5.30	0.395	10.58	128.83
					00:58:03	0.251	5.49	0.404	10.98	127.71
					01:00:03	0.248	5.69	0.417	11.36	126.22
					01:02:03	0.248	5.88	0.426	11.75	126.22
					01:04:03	0.248	6.09	0.436	12.16	125.85
					01:06:04	0.251	6.28	0.439	12.55	127.34
					01:08:04	0.250	6.47	0.450	12.93	126.96
					01:10:04	0.250	6.67	0.460	13.33	126.96
					01:12:04	0.251	6.87	0.467	13.72	127.34
					01:14:04	0.250	7.06	0.474	14.11	126.96
					01:16:04	0.248	7.25	0.487	14.49	125.85
					01:18:04	0.248	7.45	0.497	14.88	125.85
					01:20:04	0.247	7.64	0.504	15.27	125.47
					01:22:04	0.245	7.84	0.508	15.66	124.73
					01:24:05	0.245	8.03	0.522	16.05	124.36
					01:26:05	0.244	8.23	0.532	16.44	123.99
					01:28:05	0.246	8.43	0.534	16.84	125.10
					01:28:56	0.245	8.50	0.535	16.99	124.73

Consolidación

τ Máx. (kPa)	135.53
δh Máx. (mm)	8.50

OP	2.600
OQ	2.990
S90	3.075
T90	8.940
T50	2.089
df (mm)	2.503
tf (min)	104.440
Vel (mm/min)	0.024

Saturado	
σ (kPa)	τ (kPa)
60.00	40.00
120.00	74.50
240.00	130.00



Condición	C (kPa)	ϕ
Saturada	12.000	26.32

Bibliografia

- Abdelmajid, H. H., & Lima, R. E. (1999). Qualificação e monitoramento dos riscos geológicos relacionados à formação geológica de Guabirota na Grande Curitiba-PR. In Anais da Mesa Redonda Características Geotécnicas da Formação Guabirota. p. 111–117.
- Aguiar, T. (2017). Análise do potencial de erodibilidade de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico da sub bacia do Rio Mutum-Paraná: Ensaios Inderbitzen (Issue Cd). Universidade Federal de Rondônia. <http://www.ri.unir.br/jspui/handle/123456789/2471>
- Aguiar, T. (2017). Análise do potencial de erodibilidade de um latossolo vermelho amarelo distrófico da sub bacia do rio mutum-paraná: ensaios inderbitzen
- Almeida, J. G. R. (2014). Erodibilidade de solos tropicais nao saturados nos municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis - GO.
- Alvarenga, M. M., & Carmo, J. C. (1976). Algunos problemas de estabilidade de taludes de corte em materiais residuais de rocha gnaissica. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. p.117–129.
- Arango, J. D. (1993). Características generales y comportamiento geotécnico de las cenizas volcánicas en la Zona del Antiguo Caldas. Universidad de Los Andes.
- Araujo. (2000). Estudo da erodibilidade de solos da Formação Barreiras - RJ. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Araujo, R. da C. (2012). Avaliação da adequabilidade dos ensaios de penetração de cone, desagregação, sucção e resistência à tração como indicativos da erodibilidade de solos: estudo de caso com solos da formação Macacu, Rio de Janeiro. XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – Cobramseg / V Simpósio Brasileiro De Jovens Geotécnicos – Geojoovem, ABMS: Porto de Galinhas – PE.
- ASTM D3080-11. (2011). Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions.
- ASTM D5298-92. (1992). Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper.
- ASTM D422-63. (2002). Standard test method for particle size analysis of soils.

- ASTM D4972-19. (2019). Standard test method for pH of soils.
- ASTM D854-10. (2010). Standard test methods for specific gravity of soil.
- ASTM D2216-10. (2010). Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass.
- ASTM D4318-10. (2010). Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils.
- ASTM D2434-19 (2019). Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head).
- ASTM D6572-20. (2020). Standard test method for determining dispersive characteristics of clayey soils by the crumb test.
- Basilio, A., Gonzalez, I., Vicente, M. F., Gorrochategui, J., Cabello, A., Gonzalez, A., & Genilloud, O. (2003). Patterns of antimicrobial activities from soil actinomycetes isolated under different conditions of pH and salinity. p.814–823.
- Bastos, C. (1999). Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Bastos, C. A. B. (2001). Proposta metodológica para avaliação geotécnica da erodibilidade de solos residuais não saturados. VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão Goiânia (GO).
- Bender, H. (1984). Erosion of fine-grained soils: a problem of shear strength in relation to stress path with changing water content. Mitt. Inst. Grundb. u. Bodenmech, ETH Zurich, 123(107).
- Bertoni, J., & Neto, F. L. (2005). Conservação do solo. São Paulo: ícone. 355p.
- Camapum de Carvalho, J., Sales, M. M., Mortari, D., Fázio, J. A., & Motta, da N. O. Francisco, R. A. (2006). Processos erosivos. In Processos erosivos no centro-oeste brasileiro. 1st ed., p. 39–88.
- Camapum de Carvalho, J. de C., Gitirana, G. de F. N., Machado, S. L., Mascarenha, M. M. dos A., & Chagas, F. da S. (2015). Solos não saturados no contexto geotécnico. 805p.
- Campos, C. (2014). Avaliação da erodibilidade pelo método Inderbitzen em solo não saturado da região de Bauru - SP. Aleph.
- Carvalho, N. O. (2008). Hidrossedimentologia Prática. 2ª Edição. Rio de Janeiro: Inter ciência.
- Castaño, C., & Tobón, J. (2005). Caracterización mineralógica de las cenizas volcánicas de la terraza de Llanogrande en Rionegro - Antioquia. p.153–168.

- Castillo, J. R., & Estrada, J. L. (2016). Determinación de zonas de erosión hídrica a partir de la ecuación universal de la pérdida del suelo (R.U.S.L.E), sistemas de información geográfica y técnicas de teledetección en la ciudad de Bogotá D.C para el año 2013. 114p.
- Cavalcante, S. P. P., & Araújo, J. C. (2005). Avaliação espacial da perda de solo por erosão dabacia experimental de Aiuaba–Ceará através do uso de SIG. In Congresso Brasileiro de Estabilidade de Encostas, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro. p. 401-413.
- Chamecki, P. R. (2002). Metodologias de laboratório para estudos da erosão hídrica em solos: aplicação a uma argila da formação guabirota.
- Conciani, W. (1998). Surgimento de vocorocas em áreas de solo colapsível. Simpósio Brasileiro de Controle de Erosão.
- Consortio Microzonificación Sísmica, I. (2006). Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, la Estrella, caldas y envigado. Área metropolitana, Medellín.
- Correa, A., & Martens, U. (2000). Caracterización geológica de las anfibolitas de los alrededores de Medellín.
- Correa, D., & Muñoz, C. (2000). Estudio del fenómeno de erosión en el campo y en el laboratorio. Universidad Nacional de Colombia.
- Cunha, C. M. L. da. (1997). Quantificação e mapeamento das perdas de solo por erosão com base na malha fundiária. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP.
- da Motta, P. E. F. (2001). Levantamento pedológico detalhado, erosão dos solos, uso atual e aptidão agrícola das terras de microbacia piloto na região sob influência do reservatório da hidrelétrica de Itutinga/Camargos-MG. UFLA: CEMIG.
- de Araújo, W. S., dos Santos, B. B., Ferreira, H. D., & Lousa, T. C. (2007). Ocorrência de galhas entomógenas na vegetação do Campus da UFG, em Goiânia, Goiás. Revista Brasileira de Biociências. p.57–59.
- de Oliveira, V. N., Gitirana, G. de F. N., dos Anjos Mascarenha, M. M., Sales, M. M., Varrone, L. F. R., & da Luz, M. P. (2021). An enhanced flume testing procedure for the study of rill erosion. *Water (Switzerland)*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/w13212956>
- del Tánago, M. G. (1991). La ecuación universal de pérdidas de suelo. Pasado, presente y futuro. *Ecología*, 5. p.33-150.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagens. (1979). Pesquisa de estabilidade de taludes: Recomendação para proteção de taludes contra erosão.
- Dey, S. (2014). *Fluvial Hydrodynamics*. (Vol. 818). Berlin: Springer.

- Dissmeyer, G. E., & Foster, G. R. (1984). A guide for predicting sheet and rill erosion on forest land. USDA For. Serv. Gen. Tech. Publ. R8-TP 6.
- Fácio, J. A. (1991). Proposição de uma metodologia de estudo de erodibilidade dos solos do Distrito Federal, UnB, Brasília, DF. Diss. Universidade de Brasília.
- Fernandes, L. P. (2015). Avaliação da erodibilidade de um perfil de solo típico da área do campo de Instrução de Santa Maria - RS. 150p.
- Fernandez, F., & Santa, N. (1964). Estudio general de suelos del oriente Antioqueño: Instituto geográfico Agustin Codazzi. p.1–93.
- Foster, G. R., Haan, C. I., Johnson, H. P., Brakensiek, D. I., & American Society of Agricultural Engineers: St. Joseph. (1982). Modeling the Erosion Process in Hydrologic Modeling of Small Watersheds. In Modeling the Erosion Process in Hydrologic Modeling of Small Watersheds. p.297–380.
- Fragassi, P. F. M., & Marques, E. A. G. (2001). Desenvolvimento de uma nova versão do aparelho Inderbitzen. In Simpósio Nacional de Controle de Erosão. CD-ROM.
- Freire, E. P. (2001). Ensaio Inderbitzen Modificado: um novo modelo para avaliação do grau de erodibilidade dos solos.
- Fu, X. T., Zhang, L. P., & Wang, Y. (2019). Effect of Slope Length and Rainfall Intensity on Runoff and Erosion Conversion from Laboratory to Field. *Water Resources*, 46(4), p.530–541. <https://doi.org/10.1134/S0097807819040080>
- Goldman, K., Jackson, T. A., & Bursztynsky. (1986). Erosion and sediment control handbook. McGraw Hill Book Co.
- Gomes de Aguiar, V. (2009). Bacia hidrográfica do córrego granada aparecida de goiânia go: os processos erosivos e a dinâmica espacial urbana.
- Gray, D. H., & Leiser, A. T. (1982). Biotechnical Slope Protection and Erosion Control. Van Nostrand Reinhold Company.
- Griebeler, N. P. (2002). Modelo para o dimensionamento de redes de drenagem e de bacias de acumulação de água em estradas não pavimentadas. Universidade Federal de Viçosa.
- Guerra, A. J. T., & Vitte, A. C. (2004). Reflexões sobre a geografia física do Brasil.
- Head, K. H. (1994). Manual of soil laboratory testing: permeability, shear strength and compressibility tests. 2nd ed.
- Hénensal, P. (1987). Le rique d'érosion hydrique des sols. Bulletin de Liaison Des Laboratoires Des Ponts et Chaussées., 150/151, 129p.

- Higashi, R. A. dos R. (2006). Metodología de uso e ocupación de los suelos de ciudades costeras brasileñas a través de SIG con base en el comportamiento geotécnico y ambiental.
- Inderbitzen. (1961). An erosion test for soils. Materials Research & Standards.
- Ingeominas. (2001). Mapa Geológico del Departamento de Antioquia. Secretaría Del Medio Ambiente. 241p.
- Justo, Á., & Morillo González, E. (1999). Técnicas de difracción de rayos X para la identificación cualitativa y cuantitativa de minerales de la arcilla.
- Khanal, A., Fox, G. A., & Guertault, L. (2020). Soil Moisture Impacts Linear and Nonlinear Erodibility Parameters from Jet Erosion Tests. ASABE, 63, p.1123–1131.
- Kirby, M., Morgan, R., John Wiley, J., & Sons, S. (1980). Soil loss estimation. Soil Erosion (Ed.), p.17–62.
- Lane, L. J., Foster, G. R., & Nicks, A. D. (1987). Use of fundamental erosion mechanics in erosion prediction. American Society of Agricultural Engineers (Microfiche collection). USA.
- Lemos, C. F. D. E. (2002). Avaliação da erosão superficial em áreas de cultivo com plantio direto e plantio convencional, utilizando o aparelho de Inderbitzen.
- Lizcano, A., Herrera, M. C., & Santamarina, J. C. (2006). Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, 6(2), p.167-198.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) & Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (UDCA). (2015). Estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023648/Sintesis.pdf>.
- Malagon Castro, D., Rubiano Sanabra, Y., Mendivelso Lopez, D., & Lopez Lopez, D. (1996). VI Congreso Colombiano de Geotecnia. Inventario Nacional de La Erosión de Las Tierras Colombianas. 19p.
- Mancilla Escobar, G. (2008). Apuntes docentes: Uso y conservación de suelos: Uso de la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE) en el campo forestal. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/120400>.
- Mendes, C. A. R. (2006). Erosão superficial em encosta íngreme sob cultivo perene e com pousio no município de Bom Jardim. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Montoya, J. J. (2009). Historical framework and state of art of landscape evolution and erosion models. 8(1), p.47–57.

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare [CORNARE], Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia [CORANTIOQUIA] & Fondo Adaptación. (2017). Plan De Ordenación Y Manejo De La Cuenca Hidrográfica Del Río Nare - Geología. Plan De Ordenación Y Manejo De La Cuenca Hidrográfica Del Río Nare. http://www.cornare.gov.co/POMCAS/planes-de-ordenacion/DocumentosFasesNare/APRESTAMIENTO_Rio-Nare.pdf
- DNER., & IPR. (1979). Recomendações para proteção de taludes contra erosão. Ministério dos Transportes. Brasil.
- Nearing, M. A., Deer-Ascough, L., & Laflen, J. M. (1990). Sensitivity Analysis of the WEPP Hillslope Profile Erosion Model. In Sensitivity Analysis of the WEPP Hillslope Profile Erosion Model. p.839–849.
- Nogami, J. S., & Villibor, D. F. (1979). Soil Characterization of Mapping Units for Highway Purposes in Tropical Areas. Bulletin of the International Association of Engineering. p.196–199.
- Partheniades, E. (1965). Erosion and deposition of cohesive soils. Journal of the Hydraulics Division, 91(1), p.105-139.
- Pruski, F. F. (2009). Conservação de solo e água: práticas mecanicas para o controle da erosão hídrica. 2ª Edição.
- Rego, J. J. V. do. (1978). Erosão superficial em taludes de corte em solo residual de Gnaiss
- Ribeiro, F. (2016). Análise de processos erosivos superficiais, transporte e sedimentação de partículas de solo e rocha intemperizada na área das minas Alegria Norte e Alegria Sul. Dissertação Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/8650>
- Romaña, J. F., Zapata, G. J., Giraldo, R. A., & Valencia, Y. (2009). Efecto de la meteorización en el comportamiento de un suelo tropical del oriente antioqueño. XV Jornadas geotécnicas de la ingeniería colombiana. 5p. <https://doi.org/10.13140/2.1.3594.4642>
- Sales, M. M., Camapum de Carvalho, J. de C., Mascarenha, M. M. dos A., Luz, M. P. da, Souza, N. M. de, & Angelin, R. R. (2017). Erosão em Borda de Reservatório.
- Salomao. (2007). Controle e prevenção dos processos erosivos. In Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. 3rd Edição, p.229–267.
- Santos, C. A., & Merschmann, M. A. C. (2001). Ensaio de erodibilidade como parâmetro no estudo de ravinas e voçorocas, na região de Santo Antônio do leite, distrito de Ouro Preto – MG. Simpósio Nacional de Controle de Erosão. p.1-8.
- Santos, C. A. dos, Sobreira, F. G., & Coelho Neto, A. L. (2002). Comportamento hidrológico superficial e erodibilidade dos solos da região de Santo Antônio do Leite, Distrito de Ouro

- Preto - MG. Rem: Revista Escola de Minas, 55(4), p.285–290.
<https://doi.org/10.1590/s0370-44672002000400010>
- Santos, R. M. M. D. (1997). Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no município de Goiânia.
- Shoji, S., Nanzyo, M., & Dahlgren, R. A. (1993). Volcanic Ash Soils: Genesis, properties and utilization. Elsevier Science. Amsterdam.
- Silva, A. P., & Melo, M. T. (2016). Análise do histórico de desenvolvimento de modelos de aparelho de Inderbitzen para a confecção de tabelas comparativas.
- Silveira, L. L. (2002). Elaboração de carta de susceptibilidade à erosão das bacias dos rios Araraquara e Cubatão-SP.
- Soares, L. A. C. (2019). Confecção de Aparelho de Inderbitzen para Avaliação do Fenômeno Erosivo em um Solo da Região Sudoeste de Anápolis (GO). Instituto Federal de Educação.
- Stephan, A. M. (2010). Análise de processos erosivos superficiais por meio de ensaio de Inderbitzen. Universidade Federal de Viçosa.
<https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/834>
- Suarez D, J. (2011). Control de erosión en zonas tropicales. <https://www.erosion.com.co/control-de-erosion-en-zonas-tropicales/>
- Tomasi, L. F. (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. Universidade Federal de Santa Maria.
http://coral.ufsm.br/engcivil/images/PDF/1_2015/TCC_LENNON.pdf
- Tomaz, P. (2003). Aproveitamento de água de chuva para áreas urbanas e fins não potáveis. Navegar Editora.
- Toy, Dr. T. J., Foster, Dr. G. R., & Renard, Dr. K. G. (2002). Soil Erosion processes, prediction, measurement and control.
- Universidad Católica de Oriente. (2014). Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa e inundaciones zona urbana. Municipio De Guarne.
[http://www.uco.edu.co/extension/territoriales/Investigaciones_y_consultorias/Documents/AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO.pdf](http://www.uco.edu.co/extension/territoriales/Investigaciones_y_consultorias/Documents/AMENAZA,_VULNERABILIDAD_Y_RIESGO.pdf)
- Universidad de Antioquia, & Área metropolitana del Valle de Aburrá. (2012). Determinación y protección de las potenciales zonas de recarga en el norte del Valle de Aburrá.
- USDA, U. S. D. of A. (1997). Predciting Soil Erosion by Water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE).

- Vargas, M. (1977). *Introdução à mecânica dos solos*. Mcgraw-Hill do Brasil.
- Villada, D., Restrepo, J & FIDAR. (2002). *Recuperación de Suelos Erosionados En Zonas de Ladera En El Suroccidente de Colombia*. I Simposio Latinoamericano Control de Erosión - Sociedad Colombiana de Geotecnia.
- Wischmeier, & Smith. (1978). *Predicting rainfall erosion losses*. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537.
- Wischmeier, W., Johnson, C., & Cross, B. (1971). *A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites*. *Journal of Soil Water Conservation*, 26, p.189–193.
- Zhang, X. C., Nearing, M. A., Risse, L. M., & McGregor, K. C. (1996). *Evaluation of WEPP Runoff and Soil Loss Predictions Using Natural Runoff Plot Data*. p 855–863.