



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Determinación de la erosión hídrica en caña panelera (*Saccharum officinarum*) utilizando un simulador de lluvia

Jose Luis Tauta Muñoz

Universidad Nacional de Colombia

Facultad Ciencias Agrarias

Bogotá, Colombia

2017

Determinación de la erosión hídrica en caña panelera (*Saccharum officinarum*) utilizando un simulador de lluvia

Jose Luis Tauta Muñoz

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

Magister en Ciencias Agrarias

Director (a):

Doctor Jesús Hernán Camacho Tamayo

Codirector (a):

Magister Gonzalo Alfredo Rodríguez Borray

Línea de Investigación:

Suelos y Aguas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad Ciencias Agrarias

Bogotá, Colombia

2017

A mi madre, la mujer que me ha enseñado a creer en El Eterno y a soñar siempre con los ojos abiertos con un mundo más allá de las posibilidades.

Agradecimientos

Un especial agradecimiento al profesor Jesús Hernán Camacho, quien lideró cada uno de los momentos emprendidos en este trabajo de investigación. Al investigador Gonzalo Alfredo Rodríguez Borray, codirector del presente estudio, y líder del proyecto “Indicadores de impacto ambiental en la agroindustria panelera”, de CORPOICA, bajo el cual fue posible el desarrollo de este estudio. Al equipo de trabajo en campo, el ingeniero Richard Sánchez y el biólogo Víctor Pulido, por su acompañamiento y contribución en las mediciones de erosión hídrica y en el muestreo de suelos. A la investigadora Bellanid Huertas y a la ingeniera Sonia Polo, por su constante apoyo y acompañamiento al proyecto. A los ingenieros Angélica Molina y Vicente de Jesús Franco, por su contribución en el diseño, y la calibración del simulador de lluvia utilizado. Al señor Carlos Narvárez Escandón, por su colaboración en campo, y por permitirnos realizar las mediciones en los lotes a su cargo. A Panela Colombia, por autorizar el estudio en una de sus fincas. A CORPOICA por financiar este proyecto, y hacerlo posible dentro de su agenda de investigación. A los conductores Belarmino Becerra y Fredy Peñuela, de CORPOICA, por su apoyo en las mediciones en campo y en el muestreo de suelos. A los colaboradores de la finca Villa Macris y sus vecinos, por su ayuda y acompañamiento en distintos puntos del trabajo en campo. A Viviana Varón por liderar la descripción del perfil característico de suelos. A la Universidad Nacional, en especial a las facultades de Ciencias Agrarias e Ingeniería por acompañar el desarrollo de la tesis de maestría, por medio de sus profesores en distintos aspectos del desarrollo del trabajo. A mi madre, a mis hermanos y a mis amigos por su apoyo, dedicación y acompañamiento en cada aspecto de mi vida. A El Eterno Creador quien hace posible cada momento en el Universo. A los jurados por su interés y participación al evaluar este trabajo de investigación.

Resumen

Con el fin de comparar las pérdidas de suelo en dos sistemas de corte tradicionalmente utilizados en el cultivo de caña de azúcar para la producción de panela, se realizaron mediciones en campo en un vertisol del municipio de Quebradanegra, Cundinamarca, en donde se presentan simultáneamente ambos tipos de corte, utilizando un simulador de lluvia. El presente trabajo se inició con el diseño y construcción del simulador, y el establecimiento de factores de variación (dos sistemas de corte, tres intensidades de precipitación, dos rangos de pendiente, y tres momentos asociados al corte). Se observó de manera general que el corte por parejo (madurez homogénea en el cultivo y por ende se corta todo a la vez) presenta mayores pérdidas de suelo con respecto al sistema de corte por entresaque (madurez no homogénea, se corta solo un porcentaje de las plantas a la vez). Por medio del diseño en parcelas subdivididas con medidas repetidas en el tiempo se encontró que la intensidad de precipitación es el factor más relevante en la pérdida de suelos, seguido por la interacción entre factores corte y momento. Finalmente se comparó la erosión potencial anual de ambos sistemas de corte, utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) para obtener un factor C asociado a cada tipo de corte, estableciendo que el corte por parejo tiene una erosión potencial anual 2,2 veces mayor que el sistema de corte por entresaque, y 9 veces menor con respecto a una condición de suelo sin cobertura vegetal.

Palabras clave: Erosión hídrica superficial, simulador de lluvia, caña panelera, pérdida de suelo.

Abstract

In order to compare soil losses in two cutting systems traditionally used in the cultivation of sugar cane for the production of *panela*, field measurements were made in a vertisol of the municipality of Quebradanegra, Cundinamarca, where both types of cut are presented simultaneously by using a rain simulator. The present work began with the design and construction of the simulator, and the establishment of variation factors (two cutting systems, three precipitation intensities, two slope ranges, and three moments associated with the cut). It was observed in a general way that the cut by evenness (homogeneous maturity in the crop and therefore cut all at once) presents a greater loss of soil with respect to the cutting system by thinning (inhomogeneous maturity, only a percentage of the plants is cut at the same time). By means of the design in subdivided plots with measures repeated over time, it was found that the precipitation intensity is the most relevant factor in soil loss, followed by the interaction between cut and moment factors. Finally, the annual potential erosion of both cutting systems was compared, using the Universal Soil Loss Equation (USLE) to obtain a C factor associated with each type of cut, establishing that the cut by even has an annual potential erosion 2.2 times greater than the cutting system by thinning, and 9 times less with respect to a soil condition without plant cover.

Keywords: superficial soil erosion by water, rainfall simulator, sugarcane growing for *panela* production, soil loss

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas	XV
Introducción	1
1. Adaptación, construcción, diseño y calibración de un simulador de lluvia, para su utilización en el cultivo de <i>Saccharum officinarum</i>.....	5
1.1 Aspectos metodológicos	7
1.2 Caracterización climática de la región de estudio	8
1.2.1 Determinación de los rangos posibles de eventos de precipitación	13
1.3 Diseño, construcción y calibración del simulador	15
1.3.1 Consideraciones iniciales.....	15
1.3.2 Calibración y ajustes	17
1.3.3 Diseño final	34
2. Evaluación del efecto de distintos valores de intensidad sobre las pérdidas del suelo, en los diferentes sistemas de corte del cultivo de la caña panelera.....	39
2.1 Estado del arte	41
2.2 Aspectos metodológicos	43
2.2.1 Determinación de los factores a evaluar y establecimiento del diseño experimental.....	43
2.2.2 Caracterización de los sitios de muestreo	48
2.2.3 Herramientas para la medición en campo	50
2.2.4 Fase de campo	51
2.2.5 Procesamiento de muestras en laboratorio	54
2.2.6 Cálculos y análisis.....	55
2.3 Caracterización inicial de suelos y rendimientos de cultivo.	56
2.3.1 Rendimientos de cultivos	63
2.4 Mediciones de erosión hídrica superficial.....	65
3. Definición de un modelo local, con base en un modelo de pérdida de suelo previamente validado.....	73
3.1 Aspectos metodológicos	74
3.2 Análisis estadístico	76
3.2.1 Parcelas subdivididas, análisis independiente de momentos	77
3.2.2 Parcelas subdivididas con análisis de medidas repetidas en el tiempo	84

3.2.3	Análisis de covariables	89
3.3	Adaptación al modelo USLE	94
3.3.1	Factor R erosividad de la lluvia	95
3.3.2	Factor K erodabilidad del suelo.....	98
3.3.3	Factor LS	101
3.3.4	Estimación factor C.....	102
3.3.5	Determinación de erosión potencial USLE	104
4.	Conclusiones y recomendaciones	107
A.	Anexo: Registro de calibraciones diseño definitivo.....	109
B.	Anexo: Datos registrados en campo. Mediciones de erosión hídrica superficial	137
	Bibliografía	143

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Proceso de adaptación, construcción, diseño y calibración del simulador de lluvia.	9
Figura 1-2: Humedad relativa multianual registrada por la estación automática Quebrada Negra, del 2005 al 2014. Fuente datos IDEAM.....	11
Figura 1-3: Precipitación multianual registrada por la estación pluviométrica Útica, de 1990 a 2015. Fuente datos IDEAM.....	12
Figura 1-4: Precipitación multianual registrada por la estación pluviométrica La Chilagua, del municipio de Nocaima, de 1988 a 2015. Fuente datos IDEAM.	12
Figura 1-5: Curva IDF de la zona de estudio, a partir de la estación (a) Tuscolo, (b) Útica y (c) Chilagua.	14
Figura 1-6: Prueba de uniformidad en una pendiente de 35%.	19
Figura 1-7: Pruebas de uniformidad e intensidad para la distribución de 6 boquillas. .	23
Figura 1-8: Representación esquemática configuración en tres bolillos.....	23
Figura 1-9: Configuración de cuatro emisores de igual caudal en línea recta.	24
Figura 1-10: Intensidad de lluvia en función de la altura de los emisores y las presiones de trabajo. Para 4 boquillas.	24
Figura 1-11: Estructura de soporte y primera configuración de emisores.....	25
Figura 1-12: Configuración de 6 emisores de distinto caudal (cuatro a los extremos, dos en el centro), en rectángulo.	28
Figura 1-13: Intensidad de lluvia en función de la altura de los emisores y las presiones de trabajo. Para 6 boquillas.	28
Figura 1-14: Primer diseño de barrero cortavientos probado en campo.	30
Figura 1-15: Esquema diseño final simulador de lluvia.	38
Figura 2-1: Etapas del proceso de erosión.	43
Figura 2-2: Estructura metodológica propuesta.	44
Figura 2-3: Diseño metodológico de factores a evaluar para la medición de erosión hídrica superficial.	48
Figura 2-4: Distribución de parcelas experimentales en la finca en la que se realizaron mediciones de erosión hídrica superficial.	50
Figura 2-5: Simulador de lluvia y parcela de escorrentía, adaptados a cultivo de caña panelera.	51
Figura 2-6: Equipo instalado en lote por entresaque después del corte (a), equipo instalado en lote por parejo (b), equipo instalado en lote con plantilla (c).	54
Figura 2-7: Metodología Fase de Campo.	54

Figura 2-8: Separación de muestras de suelo perdido por separación mediante papel filtro	55
Figura 2-9: Separación de arenas.....	62
Figura 2-10: Perfil característico del suelo de la finca.....	63
Figura 2-11: Componentes de balance hídrico en cada boquilla utilizada. Momento después del corte y plantilla	67
Figura 2-12: Componentes de balance hídrico en cada boquilla utilizada. Momento intermedio y antes del corte.	68
Figura 2-13: Comparación de resultados de pérdida de suelo expresados en kg ha^{-1} , en tiempos asociados al corte.....	70
Figura 2-14: Comparación de resultados de pérdida de suelo expresados en kg ha^{-1} , con los tres valores de intensidad de precipitación.	70
Figura 2-15: Comparación de resultados de pérdida de suelo, expresados en kg ha^{-1} . Plantilla, Entresaque después del corte y Parejo después del corte.....	71

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Estaciones de interés. Fuente IDEAM (2012).....	10
Tabla 1-2: Consideraciones iniciales para el diseño del simulador.....	17
Tabla 1-3: Parámetros de diseño del simulador.....	18
Tabla 1-4: Coeficientes de uniformidad e intensidades para la configuración de una línea con 4 boquillas.....	26
Tabla 1-5: Características de la lluvia simulada 6 boquillas.....	29
Tabla 1-6: Datos obtenidos en pruebas de laboratorio con configuración tres bolillo, 5 boquillas # 8, con antigoteo i-mini Wobbler.....	32
Tabla 1-7: Datos obtenidos en pruebas de laboratorio con configuración tres bolillo, 5 boquillas # 10, con antigoteo i-mini Wobbler.....	33
Tabla 1-8: Datos configuración perpendicular, aspersores i-wob up3 en los extremos a 5 m de altura.....	35
Tabla 1-9: Datos configuración perpendicular, aspersores i-wob up3 en los extremos a 4 m de altura.....	35
Tabla 1-10: Datos configuración perpendicular, aspersores i-wob up3 en los extremos a 3 m de altura.....	36
Tabla 1-11: Datos configuración perpendicular, aspersores i-wob up3 en los extremos a 2 m de altura.....	36
Tabla 2-1: Propiedades físicas del suelo y métodos de determinación.....	53
Tabla 2-2: Coordenadas geográficas de parcelas de medición de erosión.....	57
Tabla 2-3: Caracterización química de suelos de lotes para medición de erosión hídrica superficial.....	58
Tabla 2-4: Caracterización física de suelos de lotes para medición de erosión hídrica superficial.....	59
Tabla 2-5: Descripción de horizontes perfil característico de suelo de la finca.....	64
Tabla 2-6: Propiedades físicas y químicas perfil característico.....	65
Tabla 2-7: Datos de rendimiento en lotes de entresaque y parejo.....	66
Tabla 3-1: Valores medios de la interacción de factores corte-intensidad. Momento después del corte, incluyendo plantilla.....	78
Tabla 3-2: Valores medios de la interacción de factores corte-pendiente. Momento Antes del corte (6 meses después del corte).....	84
Tabla 3-3: Resultados análisis de efectos fijos. Parcelas subdivididas y análisis de medidas repetidas.....	86

Tabla 3-4:	Diferencias de medias de mínimos cuadrados para la variable pérdida de suelo según factores sistema de corte, pendiente, boquilla y momento del corte.....	87
Tabla 3-5:	Diferencias de medias por mínimos cuadrados para pérdida de suelo según interacción de factores corte y momento.....	88
Tabla 3-6:	Categoría de estructura USLE. (Wishmeier & Smith, 1978).....	99
Tabla 3-7:	Categoría de permeabilidad USLE. (Wishmeier & Smith, 1978).....	100
Tabla 3-8:	Factores K de erodabilidad del suelo para lotes de medición.....	101
Tabla 3-9:	Factores LS, asociados a características de la pendiente, para lotes de medición.	102
Tabla 3-10:	Factores C, estimados para sistemas de corte y momentos de medición... ..	103
Tabla 3-11:	Rango de erosión potencial. FAO (1979) citado por González et al. (2016).	105

Introducción

La erosión del suelo y la redistribución asociada del mismo impulsada por el agua y el viento son procesos naturales que pueden ser acelerados por actividades antrópicas, y por cambios en el uso de la tierra, una mala gestión agrícola, la deforestación y el sobrepastoreo (Dercon *et al.*, 2012). La erosión produce pérdidas irreversibles del suelo, a través del tiempo y reduce algunas de sus funciones como la producción de biomasa, y la capacidad de infiltración. El proceso de erosión puede ser visto como el balance entre la erosividad, que incluye las fuerzas que causan movimiento, y la erodabilidad, la cual es la resistencia del suelo a ser movido, esta última se relaciona con las características físicas y químicas del suelo (Shakesby, 2011). Yang (1992), incluyó la estabilidad de agregados como una de las propiedades por medio de las cuales puede ser expresada la erosión. Luo *et al.* (2003), describieron la materia orgánica y el contenido de arcilla como los factores intrínsecos más importantes en el manejo de la erosión del suelo. Shi *et al.* (2007) sugirieron que la composición de la estabilidad de agregados y la tasa de deterioro de la estructura del suelo podrían ser usadas para indicar la capacidad del suelo a resistir la erosión bajo distintos tipos de usos y coberturas. Factores físicos como el clima, la topografía, la cobertura de la tierra, y las características específicas del suelo tienen efectos importantes sobre los procesos de erosión y formación del suelo (Gobin, 2004).

El principal agente de transporte de partículas livianas de suelo es el agua de escorrentía, la cual se presenta cuando la velocidad de la aplicación del agua excede la velocidad de infiltración. Cuando la cantidad de agua aplicada al suelo es mayor que la infiltración básica, los poros superficiales se comienzan a llenar. Si dicha cantidad de agua continúa siendo mayor a la infiltración básica, el agua ocupará todo el espacio poroso del suelo, dando inicio a la escorrentía superficial (Neitsch *et al.*, 2005). Cuando el agua es el agente de erodabilidad, la erosividad se deriva de la energía de las gotas de lluvia y del flujo superficial (Shakesby, 2011). La importancia de la escorrentía superficial se ha evidenciado no solo en términos del transporte de partículas de suelo, sino de otros

contaminantes, como nitratos, fosfatos y pesticidas, los cuales podrían estar agregados como partículas o en solución, y por lo tanto podrían terminar en cauces de agua (Evans, 2010).

Aunque la erosión es un proceso natural, que permite el desarrollo y el transporte de nutrientes, hacia zonas de alto potencial productivo agrícola, se puede acelerar por procesos antrópicos, llevando al suelo a niveles de degradación en los que el desarrollo de cualquier sistema vegetal sería difícil. La existencia de diversos métodos y modelos desarrollados para la predicción, evaluación y medición de la erosión hídrica superficial permite entender el comportamiento de dicho fenómeno, así como establecer recomendaciones de manejo y control para reducir su efecto negativo sobre el desarrollo de cultivos. Sin embargo, las condiciones de distintas regiones, con diversas prácticas de manejo de los cultivos, hace necesario ajustar las metodologías y modelos existentes para que se aproximen a las condiciones reales sobre las cuales se quiere trabajar. Tal es el caso del cultivo de caña de azúcar para la producción de panela, el cual contribuye con cerca del 3,5% del PIB agrícola y vincula a cerca de 370.000 personas, convirtiéndose en uno de los cultivos agroindustriales más importantes en términos sociales y económicos para el país (García *et al.*, 2007). La caña panelera, por ser un cultivo semipermanente y por el manejo biológico de sus problemas fitosanitarios, se considera una especie conservacionista que protege el suelo de la erosión y mantiene el equilibrio de los agroecosistemas en las zonas de ladera (García *et al.*, 2007). Sin embargo, en su gran mayoría la caña panelera se establece en suelos de ladera donde las condiciones climáticas, topográficas y el manejo del cultivo, pueden alterar el proceso natural de erosión.

Contar con información respecto a la erosión del suelo, sobre muchas escalas de tiempo y espacio es esencial para evaluar la severidad del fenómeno y diseñar estrategias efectivas para la conservación de este recurso y la producción sostenible de cultivos (Benmansour *et al.*, 2013). El uso de un simulador permite realizar varias mediciones en un día, y la posibilidad de no tener que esperar un evento natural de precipitación para obtener los datos. Iserloh *et al.* (2013) describen los simuladores como instrumentos esenciales para la investigación de la dinámica del proceso de erosión del suelo a nivel superficial. Ries *et al.* (2014) mencionan que datos importantes respecto a las reacciones, interacciones e impactos sobre los niveles de erosión de suelo se producen generalmente

en condiciones de laboratorio con suelos disturbados, lo cual no refleja la respuesta del sistema natural, por lo cual hacen uso de un simulador de lluvia portable para cuantificar el impacto relativo de la lluvia impulsada por el viento en la erosión. Lora *et al.* (2016) resaltan que en las últimas décadas los simuladores de lluvia han representado una herramienta amplia para el estudio de interacciones hidrológicas de precipitación y suelo.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo general, determinar y comparar niveles de erosión hídrica superficial, medidos en suelos característicos de la región panelera de Cundinamarca, con dos sistemas diferentes de corte, en distintas etapas fenológicas y momentos asociados al corte, bajo tres valores de intensidad de precipitación, utilizando un simulador de lluvia. Lo anterior se logró por medio de la ejecución de los siguientes objetivos específicos:

- Adaptar, construir, diseñar y calibrar un simulador de lluvia, para su utilización en el cultivo de *Saccharum officinarum*, teniendo en cuenta el arquetipo y tamaño de las plantas.
- Evaluar el efecto de tres valores de intensidad de lluvia sobre las pérdidas de suelo, en los dos sistemas de corte del cultivo de la caña panelera, identificando el mejor sistema como aquel que brinda la mayor protección ante eventos erosivos.
- Definir un modelo local de erosión hídrica para los dos sistemas de corte del cultivo y relacionarlo con los patrones de intensidad de lluvia presentes en la región de estudio, con base en un modelo validado para predicción de pérdida de suelos.

Se establece como hipótesis inicial la existencia de un tipo de sistema de corte, que ofrece la mejor protección ante procesos de erosión, bajo valores altos de intensidad de lluvia, y una aproximación a un modelo existente que permita representar la pérdida de suelo en las condiciones de manejo locales. Para la región y las condiciones específicas de estudio se obtienen valores de coeficientes de pérdida de suelo, en kilogramos por hectárea, relacionados con los sistemas de corte del cultivo de caña de azúcar para la producción de panela, y valores de intensidad de precipitación asociados con la región. Además, se establece el efecto de la intensidad de la lluvia sobre las pérdidas de suelo, por medio del cambio de esta variable en el simulador, en la región donde se presentan simultáneamente sistemas de corte de caña por parejo y por entresaque. Finalmente se comparan

estadísticamente los niveles de suelo perdido, y se establece cuál de los sistemas de manejo de corte de la caña permite mayor protección del suelo, ante eventos erosivos.

Se realizaron mediciones en dos sistemas de corte correspondientes a: corte por entresaque, y corte por parejo, este último a su vez se diferencia de aquel que se realiza iniciando desde la preparación del suelo, y el que se lleva a cabo con plantas a las que se les ha realizado algún corte anterior (soca). En el corte por parejo se tienen plantas con crecimiento uniforme de tallos, y por lo tanto maduran al mismo tiempo, de esta forma se puede hacer un seguimiento de acuerdo con el estado fenológico, por su parte en el corte por entresaque, se tienen plantas que se encuentran en distintos estados de desarrollo dentro del mismo lote. Por otra parte, se tienen en cuenta variables relacionadas con la región de estudio, para esto se incluyen dos intervalos de pendiente, se establecen tres niveles de intensidad de acuerdo con los rangos determinados por el análisis de datos históricos de intensidades de precipitación, simulados con el uso de boquillas, y se realizan mediciones en tres momentos distintos asociados con el corte en parcelas delimitadas por láminas en acero inoxidable con dimensiones de 4 x 2 m.

1. Adaptación, construcción, diseño y calibración de un simulador de lluvia, para su utilización en el cultivo de *Saccharum officinarum*.

Debido a la irregularidad de eventos climáticos relacionados con el fenómeno de erosión hídrica superficial, se han realizado estudios en los que se implementa el uso de simuladores de lluvia, herramienta con la cual se permite tomar mediciones cuando se requiere, bajo distintos valores de intensidad de precipitación o tamaño de gotas (FAO, 2015). Sangüesa *et al.* (2010) destacaron la importancia de un simulador de lluvia, como una herramienta que permite estudiar procesos de pérdida de suelo y escorrentía generados por la acción de la lluvia. Cheng (1995), estudió la erosión de siete tipos de suelos bajo lluvia simulada y estableció la relación entre la descarga, la pérdida de suelo y el tiempo. Muchos estudios han mostrado a pequeña escala, una alta variabilidad espacial de erosividad de la lluvia, en escalas de tiempo cortas (Mabit *et al.*, 2014). Parson y Foster (2013), mencionan que una observación común en suelos agrícolas en Europa muestra que la escorrentía, particularmente en suelos cercanos a saturación, ocurre bajo niveles muy bajos de intensidad de lluvia.

La simulación de lluvia es una técnica para aplicar lluvia similar a la precipitación natural, se emplea para realizar estudios de infiltración, erosión, escorrentía, lavado de nutrientes, encharcamiento, salpicadura, lavado de pesticidas, lavado de sales, humedad del suelo y encostramientos generados por la acción de la lluvia (Sangüesa *et al.* 2010). Los simuladores de lluvia permiten emular la precipitación de forma más rápida, eficiente, controlada y adaptable a la lluvia natural, así como la obtención de datos de manera rápida en un tiempo relativamente corto, con relación a mediciones realizadas con lluvia natural. En cuanto a mediciones de pérdida de suelo, los datos obtenidos por medio de la

simulación de lluvia permiten calibrar, validar y verificar los modelos de predicción de erosión (Wischmeier & Smith, 1978).

Lora *et al.* (2016) mencionan que entre los criterios más importantes para obtener una lluvia simulada ideal se encuentran aquellos que tienen como objetivo la similitud a las gotas producidas por la lluvia natural (tamaño, velocidad, ángulo de impacto), otros relacionados al comportamiento (uniformidad espacial, capacidad de reproducir tormentas de diferente duración e intensidad), y las características deseables de portabilidad y bajo costo. De acuerdo con Esteves *et al.* (2000) los simuladores de lluvia se pueden clasificar en dos tipos: Formadores de gota, construidos usualmente con agujas hipodérmicas, y los pulverizadores o tipo aspersor. La elección de uno u otro se relaciona normalmente con restricciones geométricas, portabilidad y costos. Los formadores de gota se utilizan comúnmente para áreas no mayores a 1 m², operan a baja presión y producen un rango estrecho de tamaño de gotas. Por su parte los pulverizadores pueden ser utilizados en áreas mayores a 1 m², operan a una alta presión y proporcionan un amplio rango de tamaño de gotas (Lora *et al.*, 2016).

Los simuladores de lluvia nacen en la década de 1930, como una herramienta de trabajo que pretende reproducir de forma experimental la lluvia. Como lo menciona Cerda (1999), los pioneros en emplear simuladores de lluvia fueron investigadores estadounidenses en procesos de erosión del suelo, seguidos por estudios de infiltración y de la hidráulica de la escorrentía. Publicaciones respecto a las características de la lluvia natural como los trabajos publicados por Laws & Parsons (1943) sobre la relación entre la intensidad y el tamaño de gota, permitieron una mejoría en la adaptación de los simuladores a las características de la precipitación natural. En las décadas de 1950 a 1970 los simuladores de lluvia fueron de gran utilidad en el desarrollo de las ecuaciones e índices de erosión extraídos a partir de estudios experimentales (Wischmeier, 1959; Wischmeier & Smith 1978), en el mismo sentido se presentó un interés respecto a la estimación de la energía cinética de la lluvia inducida al impacto de las gotas con la superficie del suelo, especialmente para simuladores diseñados para controlar dinámicas de erosión, generación de escorrentía, y cambios en la velocidad de infiltración debido a capas endurecidas (Lora *et al.*, 2016).

El simulador de lluvia permite predecir las pérdidas de suelo por erosión y escorrentía (Martínez *et al.* 2001; Faria *et al.*, 2013), así como otros componentes del ciclo hidrológico como la infiltración, lavado de sales y flujo subsuperficial, entre otros (Cerdeña, 1999), los cuales permiten seleccionar prácticas de conservación de suelo y agua, con el fin de reducir los impactos ambientales. Adicionalmente, con los simuladores de lluvia es necesario evaluar la erodabilidad del suelo, la longitud de la pendiente, la inclinación del terreno, la cobertura vegetal en diferentes estadíos, rotaciones, nivel de fertilización, prácticas de labranza, tratamiento de residuos, etc. (Carvajal, 1998). Para evaluar la erosión del suelo los simuladores son herramientas que facilitan el entendimiento y la evaluación de la capacidad de la lluvia para causar la escorrentía, además de la susceptibilidad del suelo a los procesos de transporte de sedimentos, en función de características como la infiltración, la textura, la estructura y otros, influenciados por los sistemas de manejo como son la topografía, la cobertura, y la labranza (Donald, 2011).

Con el fin de establecer las características a simular, con relación a la intensidad de precipitación, se realizó una búsqueda de información climática importante para la representación, el entendimiento y la determinación de los valores de intensidad que se consideraron pertinentes a ser simulados, por su magnitud, que se asume es proporcional a los niveles de suelo perdido, y por su frecuencia en la región de estudio, ya que de esta forma se puede simular de alguna manera el comportamiento del proceso de erosión a través de algún tiempo determinado. En este capítulo se presenta la recopilación de las principales características climáticas de la región dónde se ubicó el estudio, así como el diseño de un simulador de lluvia para la medición de erosión hídrica superficial en cultivos de caña panelera.

1.1 Aspectos metodológicos

Para la adaptación, construcción, diseño y calibración del simulador de lluvia, se inició con la recopilación de información climática de precipitación, temperatura, humedad relativa y demás variables disponibles en las estaciones climáticas y pluviométricas ubicadas en la región de estudio (Bases de datos IDEAM). De acuerdo con los registros de lluvias de los últimos 20 a 25 años, se determinó la frecuencia de valores de intensidad, con la construcción de curvas Intensidad Frecuencia Duración, de esta forma se puede estimar a

que período de retorno, corresponden distintos rangos posibles de intensidad a simular con el equipo.

El proceso de diseño propiamente dicho inició con el cálculo de ecuaciones hidráulicas necesarias para calibrar la presión de entrega a las boquillas seleccionadas, y la elección de materiales de construcción. Luego se llevó a cabo el diseño y construcción del simulador con el fin de realizar las evaluaciones de erosión hídrica superficial, por lo cual se adaptó a las condiciones específicas del cultivo de caña panelera (*Saccharum officinarum*). Se llevó a cabo la calibración del equipo realizando pruebas preliminares en campo, y en la región de estudio, sobre el sistema hidráulico para verificar entrega de las boquillas, uniformidad (coeficiente de uniformidad de Christiansen), dispersión del tamaño de gotas (papel hidrosensible), cálculo de energía cinética (cálculo de la velocidad inicial y distribución del tamaño de gotas), eficiencia del simulador (relación entre la intensidad real del área de la parcela y la entrega total de las boquillas). El proceso metodológico descrito anteriormente, se presenta en la Figura 1-1.

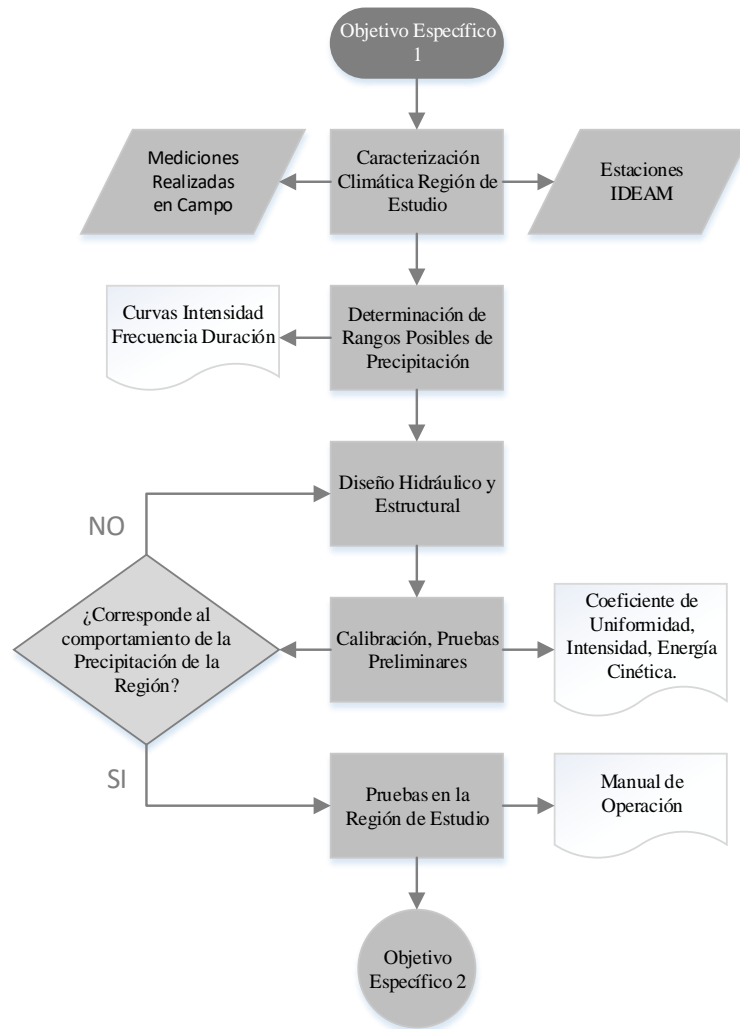
1.2 Caracterización climática de la región de estudio

El departamento de Cundinamarca representa aproximadamente el 2,1% de la extensión del país, con un área de 24.210 km², en contraste según datos del MADR (2006) posee el 18% del total nacional de la superficie cultivada de caña de azúcar para la producción de panela. Cundinamarca está situado en la zona central del territorio colombiano, en la Región Natural Andina (IGAC, 2000), que cubre la cordillera Oriental desde sectores de la vertiente oriental hasta el río Magdalena (límite occidental). La presencia de la cordillera oriental genera una zonificación altitudinal del clima por pisos térmicos en el departamento (Pabón, 2011).

El cultivo de caña se extiende principalmente en el occidente de Cundinamarca en los municipios de Caparrapí, La Peña, Nocaima, Villeta, Quebradanegra, Útica, Quipile, Guaduas, Nimaima, Vergara, La Mesa, El Peñón y Sasaima, donde predomina el clima cálido con una topografía de pendiente alta a fuertemente inclinada (Rodríguez *et al.*, 2004). Los municipios donde se presenta la producción de panela presentan un valor

medio medido en las cabeceras municipales de 21,9°C de temperatura, una altitud de 1204 msnm y una precipitación media de 1784 mm año⁻¹.

Figura 1-1: Proceso de adaptación, construcción, diseño y calibración del simulador de lluvia.



De acuerdo con una encuesta de caracterización y tipificación de productores de panela desarrollada por CORPOICA en el año 2015 se observó que, en el departamento de Cundinamarca, se presentan en una mejor proporción el corte de cultivos por entresaque

(63,1%), por parejo (34,2%), y por ambos sistemas simultáneamente (2,7%)¹, razón por la cual se seleccionó esta región para realizar los análisis de intensidad – frecuencia – duración de precipitación, con el fin de servir como insumo para el diseño del simulador de lluvia. Las mediciones se llevaron a cabo en una finca ubicada en el municipio de Quebradanegra, dónde se encontraron de manera simultánea lotes manejados por entresaque y parejo.

En la Tabla 1-1, se indican las estaciones de interés para el presente estudio. De la información disponible en las estaciones, se consideró principalmente la precipitación, a partir de la cual se identificaron las intensidades de lluvia. También se realizó una recopilación de información procedente de estudios realizados en la zona del noroccidente del departamento de Cundinamarca, que permite conocer otras características climáticas.

Tabla 1-1: Estaciones de interés. Fuente IDEAM (2012)

Código	Nombre	Latitud	Longitud	Altitud, msnm	Fecha Instalación
23060140	Tusco	5° 4' 41,6'' N	74° 36' 42,5'' W	975	15/02/1971
23060260	Chilagua	5° 3' 52,7'' N	74° 22' 55,3'' W	1500	15/12/1987
23060190	Útica	5° 11' 45,9'' N	74° 29' 7,8'' W	497	15/09/1974
23065190	Quebradanegra	5° 8' 15,4'' N	74° 28' 52,5'' W	1107	06/10/2005

De la estación Quebradanegra se obtuvo la información para la humedad relativa desde el 2005 hasta el 2014 (Figura 1-2). De la obtención de la serie histórica de esta estación se observa que julio es el mes con menor humedad relativa media (68,22%) y que en el mes de noviembre se presenta la mayor humedad relativa media, por encima del 86,46%. Empleando los mapas de Pabón (2011) elaborados para la CAR, donde se presenta información del periodo comprendido entre los años 1971 y 2000, se observa una humedad relativa media entre 70 y 75 % para la zona de interés, información que corresponde a la observada en la estación Quebradanegra (media de 74,20% de humedad relativa), además se observa que la zona presenta una temperatura media entre 20 y 24°C, y una

¹ Resultados con base en encuesta aplicada por “Indicadores de impacto ambiental de la agroindustria panelera”, CORPOICA, 2015.

precipitación que varía entre 1200 y 1800 mm anuales. Para la Provincia del Gualivá se recibieron datos del periodo correspondiente a diciembre de 1987 hasta junio del 2015, de la estación Chilagua FCA en Nocaima, y Útica en el municipio del mismo nombre, se observó que el valor promedio anual de días de lluvia es de 141 días al año, se registró en los años de medición un máximo de 198 días y un mínimo de 94 días al año. Los meses que presentan los valores más altos de número de días mensuales de precipitación corresponden a abril, octubre y noviembre con un promedio de 16 días de precipitación al mes, y los valores mínimos, se registran en los meses de junio a agosto con promedio de 8,6 y 7 días respectivamente.

Figura 1-2: Humedad relativa multianual registrada por la estación automática Quebrada Negra, del 2005 al 2014. Fuente datos IDEAM.



De la estación pluviométrica Útica, se observaron los valores multianuales de la lluvia total mensual, presentados en la Figura 1-3, de donde se obtiene que la lluvia promedio anual total es de 1297 mm, con un comportamiento bimodal, con picos presentados en los meses de marzo a mayo y de septiembre a noviembre, con una precipitación máxima mensual promedio de 220,20 mm en el mes de octubre, y una precipitación mínima mensual promedio de 53,76 mm en el mes de julio. De la estación pluviométrica La Chilagua, ubicada en el municipio de Nocaima, se observan los valores multianuales de la lluvia total mensual, presentados en la Figura 1-4, de donde se obtiene que la lluvia promedio anual total es de 1690 mm, con un comportamiento bimodal, con picos presentados en los meses de marzo a mayo y de septiembre a noviembre, con una precipitación máxima mensual

promedio de 248,88 mm en el mes de octubre, y una precipitación mínima mensual promedio de 58,83 mm en el mes de julio.

Figura 1-3: Precipitación multianual registrada por la estación pluviométrica Útica, de 1990 a 2015. Fuente datos IDEAM.

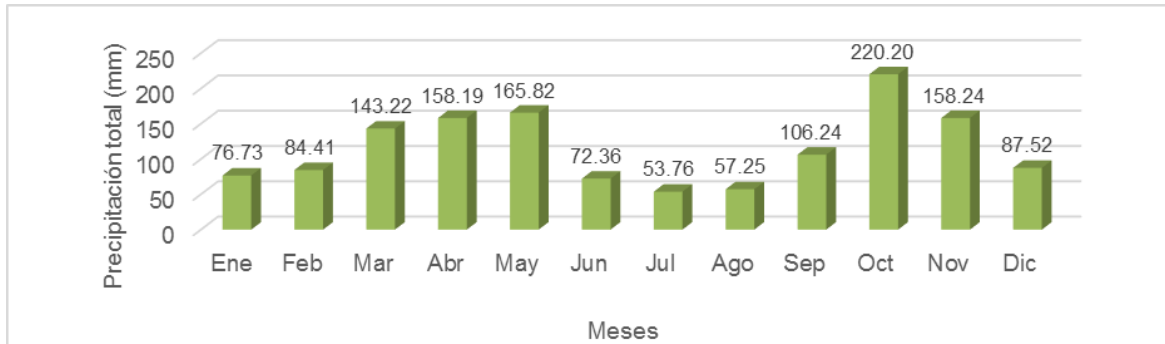
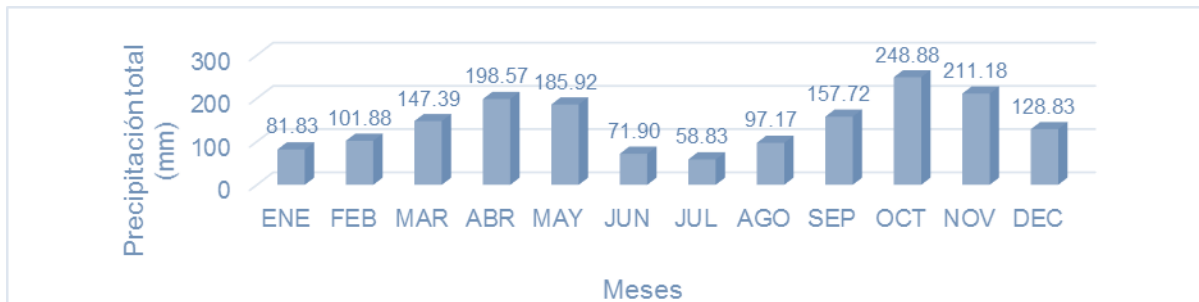


Figura 1-4: Precipitación multianual registrada por la estación pluviométrica La Chilagua, del municipio de Nocaima, de 1988 a 2015. Fuente datos IDEAM.



Se observó en ambos municipios una clara tendencia de régimen bimodal de precipitación, con períodos de alta precipitación en los meses de marzo a mayo y en los meses de septiembre a noviembre. En ambos casos, este segundo período es el que presenta la mayor época de lluvia. Además, en ambos casos se determinó que el mes con más bajas precipitaciones es el mes de julio, y por otra parte el mes con el máximo de precipitaciones mensuales, corresponde a octubre. Por otra parte, se observó en ambas estaciones, que el período más seco del año corresponde a los meses de junio a agosto.

1.2.1 Determinación de los rangos posibles de eventos de precipitación

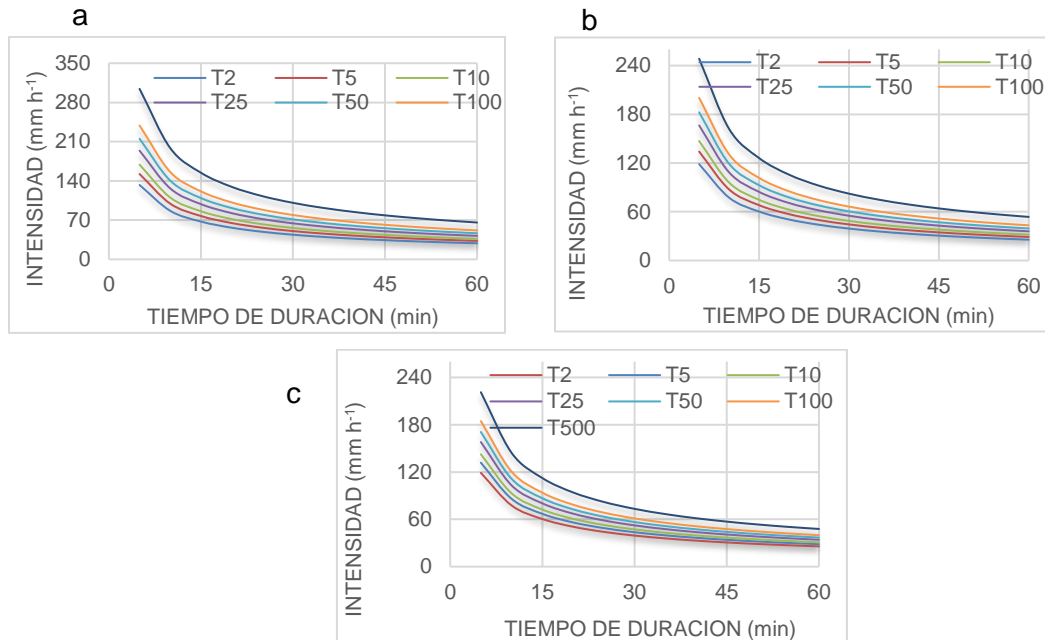
Para el análisis del comportamiento de la intensidad de precipitación con relación a la frecuencia con la que ocurre, en función de su duración, se sigue la metodología de la determinación de las curvas de Intensidad Duración Frecuencia, de las cuales se puede obtener una expresión que relaciona la probabilidad de ocurrencia de una intensidad, asociada a una duración, y al periodo de retorno, o el tiempo en el cual tiene mayor probabilidad de ocurrir. Las curvas IDF asocian la intensidad máxima con la duración de la lluvia y la probabilidad de ocurrencia o frecuencia (Bateman, 2007). Inicialmente se delimitó el área de estudio, con las estaciones meteorológicas que tuvieran datos pluviométricos con un periodo mínimo de 10 años y se tomaron datos de hasta 25 años.

Se utilizaron las precipitaciones máximas mensuales, para luego determinar las precipitaciones máximas del año respectivo, con el fin de calcular la precipitación máxima probable, la cual se define como la mayor cantidad de precipitación meteorológicamente posible que corresponde a determinada duración en una cuenca hidrográfica de un determinado lugar en un período dado del año (WMO, 2009), y se obtienen los resultados para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años. La representación matemática de la curva de intensidad duración frecuencia se presenta en la Ecuación (1.1)

$$I = \frac{K * T^m}{t^n} \quad (1.1)$$

Dónde I es la intensidad de lluvia en mm h^{-1} , T es el periodo de retorno en años, t es la duración de la lluvia en min y K , m , n son parámetros de ajuste adimensionales. Posteriormente se recolectó la información pluviométrica mensual de las tres estaciones seleccionadas, Útica en el municipio que lleva su nombre, Tuscolo en el municipio de Guaduas y Chilagua FCA en el municipio de Nocaima, para luego ser tabulada de forma ordenada facilitando así el manejo. Las curvas de Intensidad Duración Frecuencia obtenidas se muestran en la Figura 1-5, donde T indica el período de retorno (PR) de la curva correspondiente, así T2, PR de 2 años, T5, PR de 5 años, T10, PR de 10 años, T25, PR de 25 años, T50, PR de 50 años, T100, PR de 100 años y T500, PR de 500 años.

Figura 1-5: Curva IDF de la zona de estudio, a partir de la estación (a) Tuscolo, (b) Útica y (c) Chilagua.



Se seleccionó la estación meteorológica Útica como la más representativa de las tres estaciones seleccionadas, debido a su ubicación central en la zona de estudio y cercanía a la finca donde se realizaron las mediciones, la estación de Tuscolo se encuentra ubicada a aproximadamente 14 km de la finca, mientras que Útica se encuentra a aproximadamente 12 km de la misma finca. Los factores obtenidos de la elaboración de las curvas intensidad frecuencia duración fueron similares, indicando que la intensidad, la frecuencia, la duración y en general las características de la precipitación son semejantes en las tres estaciones, como también se observó en el comportamiento de las precipitaciones multianuales. La expresión obtenida se presenta a continuación:

$$I = \frac{322,4 * T^{0,15}}{t^{0,62}} \quad (1.2)$$

De la obtención de las curvas, se pueden obtener los períodos de retorno a los que corresponden las intensidades que por condiciones de presión de trabajo y de selección de boquillas se ajustan a las condiciones representadas en la región de estudio.

1.3 Diseño, construcción y calibración del simulador

1.3.1 Consideraciones iniciales

Con el interés de tener valores de referencia en cuanto a parámetros cuantificados en los ensayos que implican simuladores de lluvia, se consultaron diferentes trabajos que presentan algunas características como el área de estudio, la altura del simulador, la presión manejada, el tamaño de gota, el tiempo del ensayo y la intensidad de la lluvia. Se observó que las áreas de los simuladores son variadas, con valores inferiores de 0,2 m², hasta de 8 m², alturas entre 1,5 y 3,6 m, trabajando con presiones desde 40 kPa hasta de 150 kPa, tamaño de gota entre 1,05 y 2,53 mm, en ensayos que pueden durar entre 10 y 60 min.

Para el proceso de diseño del simulador, se siguió una metodología en la que se inició con la identificación de la necesidad, el planteamiento del objetivo que tendrá el elemento a construir, la definición de las especificaciones de desempeño, el cálculo de los parámetros hidráulicos preliminares y el proceso de calibración, validación y ajustes necesarios para suplir las necesidades óptimas de funcionamiento del simulador. La calibración del simulador se realizó a partir de un caudal aplicado, expresado como intensidad de la lluvia, al cual se le evalúa el coeficiente de uniformidad, además de algunas otras características como el tamaño de gotas, la altura, la velocidad y la energía cinética de caída de las gotas.

- Cultivo de caña de azúcar para la producción de panela.

El cultivo en el cual se realizan las mediciones de erosión hídrica superficial corresponde a la especie *Saccharum officinarum*, planta monocotiledónea, perteneciente a la familia de las gramíneas de gran tamaño, perene, cuyo origen posiblemente corresponde al Sudeste Asiático, perteneciente a la franja climática tropical (Sierra, 2010). La caña se desarrolla en zonas donde la temperatura media fluctúa entre 25 y 27°C, la temperatura ideal del suelo para el desarrollo normal de las raíces y la toma de nutrientes oscila entre 29 y 32°C, necesita de 8 a 9 mm de agua ha⁻¹ día⁻¹ durante la época de verano, y en la época más fría entre 3 y 4 mm ha⁻¹ día⁻¹, crece en diferentes tipos de suelos, desarrollándose mejor en suelos de características texturales franco arcillo arenosos y arcillo limosos. No crece

bien en suelos arenosos, sin retención de humedad, ni en suelos demasiado pesados, arcillosos, y sin drenaje interno (García *et al.*, 2007).

En caña para panela se utilizan dos sistemas de corte: por entresaque o desguíe y corte por parejo. El corte por entresaque, consiste en recolectar las cañas maduras, dejando en el campo las inmaduras para su posterior cosecha, la frecuencia de corte depende de la capacidad que tenga la planta para regenerar nuevos tallos y es tradicionalmente utilizado por pequeños productores; mientras que el corte por parejo es utilizado en cultivos tecnificados, donde debido al crecimiento uniforme de los tallos, alcanzan al mismo tiempo su estado óptimo de madurez para corte (García *et al.*, 2007). La caña panelera, por ser un cultivo semipermanente y por el manejo biológico de sus problemas fitosanitarios, se considera una especie conservacionista que protege el suelo de la erosión y mantiene el equilibrio de los agroecosistemas en las zonas de ladera (García *et al.*, 2007). A su vez en su gran mayoría la caña panelera se establece en suelos de ladera, lo cual limita su manejo técnico (Gómez & Lastra, 1995)

- Cálculo de ecuaciones hidráulicas necesarias para calibrar la presión de entrega a las boquillas seleccionadas.

Para la definición del diseño estructural, que es el cuerpo que soporta las boquillas que conforman el mecanismo que realiza la entrega del agua, y por ende la simulación propiamente dicha, además de ser el componente que permite la elevación necesaria para cubrir la altura máxima del cultivo, y alcanzar valores de energía cinética similares a los de la precipitación natural, se tuvieron en cuenta ciertas consideraciones asociadas al cultivo como se presentan en la Tabla 1-2.

Se inicia el proceso de cálculo con la determinación del caudal máximo, el cual es el parámetro con el que se definen las dimensiones de los elementos del sistema hidráulico. Para el dimensionamiento del sistema en condiciones máximas la intensidad de lluvia con un periodo de retorno de 2 años, para la estación de Útica, definida por las curvas de Intensidad Frecuencia y Duración es de 43,97 mm h⁻¹. Se realizaron los cálculos al suministrar un factor de seguridad de 2,2 a la intensidad determinada dando un valor de 100 mm h⁻¹ para un tiempo de análisis de 30 minutos, valor empleado comúnmente en

otros estudios (Arnaez *et al.* 2007; Aoki & Sereno, 2006; Sheridan *et al.*, 2008), al tener esta intensidad máxima relacionada con el área de la parcela de escorrentía de 8 m², se obtienen los parámetros presentados en la Tabla 1-3.

Tabla 1-2: Consideraciones iniciales para el diseño del simulador

Parámetro	Descripción
Altura	- Altura máxima 5 m. Posibilidad de tener una altura mínima, que permita su transporte y la instalación de elementos asociados.
Área	- Área mínima 8 m ²
Tamaño de Gota	- 0 a 7 mm de diámetro (límite indicado por FAO, 1997)
Características	- Trabajo en distintas pendientes - Portabilidad - Durabilidad
Elementos Asociados	- Tanque de suministro de agua - Parcela de escorrentía - Mecanismo de recolección de suelo perdido por escorrentía

1.3.2 Calibración y ajustes

La calibración de un simulador se realiza a partir de un caudal aplicado relacionado con la intensidad de precipitación que se requiera simular, expresado como intensidad de la lluvia, al cual también se le evalúa el coeficiente de uniformidad, además de algunas otras características que se describen a continuación.

- Intensidad de la lluvia

Generalmente se diseñan simuladores con intensidad constante, aunque la intensidad varía normalmente en el transcurso de una lluvia natural, resulta poco práctico implementarlo en un simulador de lluvia. Se emplean intensidades de precipitaciones de 25 mm h⁻¹ para zonas templadas, o de 75 mm h⁻¹ para precipitaciones en zonas tropicales o semiáridas (FAO, 1997).

Tabla 1-3: Parámetros de diseño del simulador

Parámetro	Valor	Ecuación
Caudal Máximo	3.5227 gpm	Intensidad x Área
Boquillas	FullJet de Cono lleno, gotas grandes, ángulo de pulverización de 120°	Condiciones de fábrica. Senninger
Presión Máxima	25 libras	Condiciones de fábrica
Caudal Máximo por boquilla	3,93 l min ⁻¹	Condiciones de fábrica
Número de boquillas	4	Caudal Máximo por boquilla / Caudal Máximo
Caudal del sistema	15,72 l min ⁻¹	Número de boquillas x Caudal Máximo por boquilla
Díámetro Tubería	1 pul	De la determinación del número de Reynolds (Flujo turbulento, sin importar el cambio de diámetro) Coeficiente de fricción de Darcy Determinación de Pérdidas por fricción y accesorios De la ecuación de energía y se multiplica por un factor de seguridad de 1.2. $\frac{P_A}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + Z_A + H_M = \frac{P_C}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + Z_C + h_f + h_k$
Altura dinámica de carga de trabajo de la bomba	43,14 m	Donde P_A : Presión antes de la bomba, kPa P_C : Presión al final de la línea de tubería, kPa Z_A : Altura antes de la bomba, m H_M : Altura dinámica de carga de trabajo de la bomba, m v : Velocidad del fluido, m ³ s ⁻¹ γ : Peso específico del agua, kg m ⁻³
Potencia de la Bomba	2,34 hp	Donde, P : Potencia, hp γ : Peso específico del agua, kh m ⁻³ Q : Caudal del sistema, m ³ s ⁻¹ H_M : Altura dinámica de carga de trabajo de la bomba, m n : Eficiencia, adimensional $P = \frac{\gamma H_M Q \times \text{factor de seguridad}}{\text{factor de conversión de unidades} \times \eta}$

- Uniformidad de la lluvia

Según Montebeller *et al.*, (2001), el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC) permite cuantificar la uniformidad de la distribución de precipitación y se afirma que valores por encima de 80% son aceptables en simuladores de lluvia. Para establecer la uniformidad, se realizan pruebas donde se ubican recipientes recolectores de agua en un área de interés, para determinar la cantidad de agua aplicada (Figura 1-6). El coeficiente de uniformidad de Christiansen, se presenta en la Ecuación (1.3)

$$CU(\%) = 100 * \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N xi - \bar{x}}{N * \bar{x}} \right) \quad (1.3)$$

Dónde: xi es cada una de las observaciones en mm desde $i:1$ hasta N , N es el número de observaciones y \bar{x} es el promedio de las observaciones en mm. En la Figura 1-6, se observa que se colocan las observaciones separadas cada 50 cm, y se realizan por medio de la recolección de lámina de agua en vasos distribuidos a la distancia de observación.

Figura 1-6: Prueba de uniformidad en una pendiente de 35%.



- Tamaño de las gotas

La distribución del tamaño de gota cercano a la lluvia natural se localiza en un rango que va desde partículas insignificantes como la niebla hasta 7 mm de diámetro, con diámetro medio entre 1 y 3 mm que varía con la intensidad (Meyer, 1988). Existen diferentes métodos para determinar el tamaño de gota, entre los más comunes se encuentra el método empleado correspondiente a la técnica del papel filtro coloreado con tinte soluble al agua propuesto por Hall (1970), donde el papel es expuesto a la lluvia durante un segundo. El diámetro se calcula a partir de las manchas circulares producidas por el impacto, ya que estas se encuentran en función de los diámetros de las gotas (Martínez *et al.*, 2001). Para ajustar el diámetro de la gota, se pueden utilizar las expresiones de Brandt (1989), que trabajó a una altura de 8,15 m, formada en un simulador de lluvia tipo goteador con cerca de 50 agujas hipodérmicas, con un tamaño máximo de gota de 1,8 mm de diámetro dispuesto en una grilla, usada por Martínez *et al.* (2001) quienes trabajaron con un simulador tipo boquillas a una altura de 3,6 m, la expresión es:

$$m = 2,931 * 10^{-5} * D_m^{2,18} \quad (1.4)$$

$$D_g = 2 * \left(\frac{3}{\pi} * m * 10^{-6} \right)^{1/3} * 1000 \quad (1.5)$$

Donde m es la masa de la gota en g, D_m es el diámetro de la mancha en mm y D_g es el diámetro de la gota en mm. Pérez *et al.* (2003) trabajaron en un simulador de boquillas a 1,5 metros con diferentes intensidades y presiones de trabajo, mencionando que el diámetro de la mancha y el diámetro de la gota están relacionadas por la siguiente expresión:

$$\frac{\text{Diámetro de la mancha}}{\text{Factor de conversión}} = \text{Diámetro de la gota} \quad (1.6)$$

$$\text{Factor de conversión} = 0,8943 dm^{0.1344}, R^2 = 0,9854 \quad (1.7)$$

El factor de conversión fue estudiado por May (1947) para gotas en el aire por el método de óxido de magnesio en un rango de tamaño de 200 a 10 μ . Para la calibración del equipo

el tamaño de gota fue determinado con papel hidrosensible para capturar las manchas de gota, expuesto a la lluvia durante un segundo, sobre el cual se produce un cambio de coloración por el impacto, luego se deja secar el papel y se escanea para procesarlo por medio de algún software de análisis de imágenes, para el caso de esta calibración se utilizó Adobe Illustrator CS5 y el software IMAGENJ. Luego de procesar las imágenes obtenidas con el papel hidrosensible, se ajustó el diámetro de la gota empleado las expresiones de Brandt (1989) y Pérez *et al.* (2003).

- Altura de caída

La altura de caída corresponde a la distancia entre el punto de salida de la gota del agua y la superficie del suelo de las parcelas de prueba (Ribeiro *et al.*, 2007).

- Velocidad de caída de la gota

Hace referencia al tiempo y velocidad terminal en el instante de impacto de las gotas con la superficie del suelo alcanzando una velocidad máxima de 9 m s^{-1} en gotas de diámetros mayores. La velocidad terminal está en función del tamaño de la gota (Ribeiro *et al.*, 2007; FAO, 1997). Gunn y Kinzer (1949) obtienen una relación del diámetro de la gota y la velocidad terminal de la gota por medio de una función exponencial, para condiciones estándar de datos experimentales como se muestra en la siguiente expresión:

$$V = 2,9379 * \ln(D_g) + 4,393 \quad (1.8)$$

Donde V es la velocidad terminal de la gota en m s^{-1} y D_g es el diámetro de la gota en mm. Beard y Pruppacher (1969) y Beard (1986) proponen para una temperatura del aire de 20°C , presión de aire 1 bar y tamaños de gota entre 0,1 a 7 mm, un polinomio de tercer orden, obteniendo valores dentro de un margen del 3% en concordancia a la expresión de Gunn y Kinzer (1949) (Van Dijk *et al.*, 2002)

$$V = 0,0561 D_g^3 - 0,912 D_g^2 + 5,03 D_g - 0,254 \quad (1.9)$$

Donde V es la velocidad terminal de la gota en m s^{-1} y D_g es el diámetro de la gota en mm.

- Energía cinética

La energía cinética o energía de un cuerpo en movimiento de la lluvia es la suma de la energía cinética de las gotas que la conforman y representa el potencial de la lluvia para generar erosión (Martínez *et al.*, 2001). Una expresión que permite estimar la energía cinética en función de la intensidad de lluvia o de la tasa de aplicación de agua es la de Wischmeier & Smith (1958) en investigaciones realizadas en Washington, para la predicción de la pérdida de suelo por la metodología USLE, que se adapta a intensidades bajas y altas, sin embargo dicha expresión sugiere que no hay límite superior en la energía cinética, cuando la investigación sugiere que existe un máximo (Van Dijk, 2002), a continuación se muestra la ecuación:

$$EC = 11,9 + 8,073 * \log I \quad (1.10)$$

Donde EC es la energía cinética de la lluvia en $J m^{-2} mm^{-1}$ e I es la intensidad de la lluvia en $mm h^{-1}$. La energía cinética obtenida en función del tamaño de gota y de la velocidad de caída por unidad de volumen de lluvia empleada en un simulador de boquillas a 1,5 metros con diferentes intensidades y presiones de trabajo es (Pérez *et al.*, 2003):

$$E = \frac{1}{2} \rho \frac{\sum_{i=1}^N d_i^3 v_i^2 n_i}{\sum_{i=1}^N d_i^3 n_i} \quad (1.11)$$

Donde E es la energía cinética por unidad de volumen en $J m^{-2} mm^{-1}$, ρ es la densidad de la gota de lluvia en $g cm^{-3}$, n_i es el número de fracción de gotas en el intervalo de diámetro de gota, d_i es el diámetro de gota efectivo en mm , v_i es la velocidad de la gota de lluvia en el impacto en $m s^{-1}$ y N es el número de intervalos de diámetros de gota.

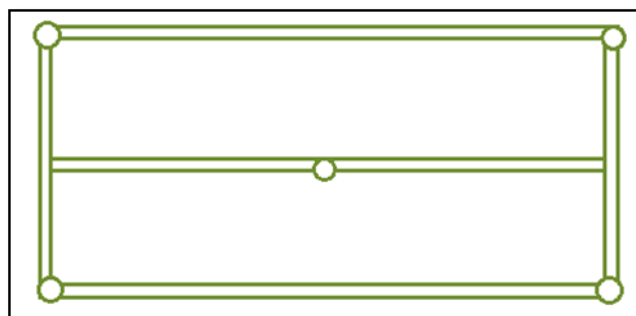
Las pruebas fueron realizadas en su gran mayoría en el laboratorio de ensayos hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, con distintas configuraciones de distribución de boquillas. La primera consistía en un lateral con 4 boquillas Fulljet FL-10VC cada 75 cm. La segunda distribución probada correspondía a un rectángulo con 6 boquillas con distancia entre emisores de 138 cm x 75 cm, en los extremos se instalaron boquillas Fulljet FL-10VC y en los puntos medios boquillas de menor caudal, identificadas como

Fulljet FL-5VC (Figura 1-7). Esta segunda configuración, fue probada en campo en una finca de caña de azúcar para la producción de panela, ubicada en el municipio de Güepesa, Santander, donde se observaron algunos aspectos a mejorar, con los cuales se probó una tercera configuración con cinco boquillas en tres bolillo, formando dos triángulos equiláteros, como se observa en la Figura 1-8, separando las boquillas a 220 cm.

Figura 1-7: Pruebas de uniformidad e intensidad para la distribución de 6 boquillas.



Figura 1-8: Representación esquemática configuración en tres bolillos.



Originalmente se probaron boquillas i mini wobbler de Senninger #8 y #10, ubicando la parcela de forma paralela y perpendicular con la dimensión mayor del cuerpo de emisores, alcanzando intensidades máximas de 45,45 mm h⁻¹. Con el fin de ampliar el rango de intensidad, se probó una cuarta configuración en la que se cambiaron las boquillas de los extremos por emisores iwob UP3, con boquillas #14, #18 y #21 ½, los cuales se ubicaron siempre de forma perpendicular, además de obtener un mejor comportamiento similar a la lluvia natural en cuanto a la dispersión del tamaño de gotas sobre una misma parcela.

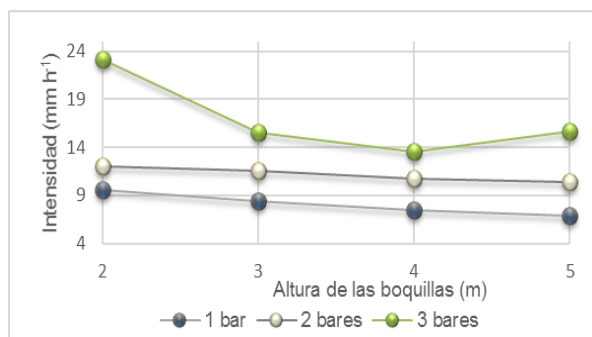
- Primera configuración de emisores

Con base en las condiciones de la zona y del cultivo, el primer diseño propuesto, se planteó a una altura de trabajo de 5 m, en la cual se disponía una barra de aspersión (aguilón) de 3 m de longitud, donde se ubicaron 4 boquillas FL-10VC distanciadas cada 75 cm (Figura 1-9). Se observó una disminución de la intensidad de precipitación a medida que la altura de los emisores aumentaba, además una relación directa entre las presiones de trabajo y la intensidad de precipitación, como se observa en la Figura 1-10.

Figura 1-9: Configuración de cuatro emisores de igual caudal en línea recta.



Figura 1-10: Intensidad de lluvia en función de la altura de los emisores y las presiones de trabajo. Para 4 boquillas.



Para esta configuración de emisores, se obtuvieron coeficientes de uniformidad de Christiansen (CUC), menores del 72 % y superiores a 53,98 %, e intensidades entre 7,5

mm h⁻¹ a 23,14 mm h⁻¹. La estructura de soporte y elevación seleccionada, corresponde a una torre elevadora TE-06, diseñada para levantar sistemas de iluminación, soporta una carga máxima de 125 kg, y alcanza una altura máxima de 5 m, su altura plegada es de 1,9 m y el área de la base es de 4 m², el peso de una torre es de 32 kg, y está construido en perfiles de acero DIN 2394, contiene un sistema de tres perfiles telescópicos accionados con cabestrante por cable de acero y guiado por poleas de acero acanaladas con cojinetes de bolas, tiene protección anti-óxido, imprimación con pintura de polvo poliéster al horno, y doble rueda trasera para transportar la torre plegada. En la Figura 1-11, se observa el simulador con sus dos torres elevadoras, el aguilón con las cuatro boquillas, instalado en una estructura metálica liviana, con el fin de reducir el pandeo de la tubería de PVC, a una altura de 2 metros. La Figura 1-11 presenta además un ensayo de uniformidad a la altura de 2 m.

Figura 1-11: Estructura de soporte y primera configuración de emisores.



En la Tabla 1-4, se observan los valores obtenidos al realizar distintas pruebas con esta calibración, en la que se presentan los valores de intensidad y los coeficientes de uniformidad obtenidos. Dado que únicamente al trabajar a un bar de presión y a una altura de 2 m se obtuvo un valor entre 70 a 80% del coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC), que es considerado un valor de uniformidad regular, y que los demás coeficientes fueron menores del 70% con una uniformidad inaceptable, se descarta este tipo de configuración, y no se analizan las demás características de la lluvia.

Tabla 1-4: Coeficientes de uniformidad e intensidades para la configuración de una línea con 4 boquillas.

Altura m	Presión bar	CUC %	Intensidad mm h ⁻¹
2	1	71,95	9,56
	2	61,95	11,98
	3	58,94	23,14
3	1	53,98	8,41
	2	64,5	11,53
	3	61,64	15,57
4	1	41,44	7,5
	2	52,34	10,75
	3	64,03	13,58
5	1	60,66	6,93
	2	60,69	10,34
	3	53,92	15,6

Utilizando el software de análisis de regresión Curve Expert Professional 2.2.0, se obtiene un modelo lineal en el que la intensidad en mm h⁻¹, se expresa como una función de la presión en bares y la altura en metros. La expresión obtenida, así como los parámetros se presentan a continuación:

$$\text{Intensidad} \left(\frac{\text{mm}}{\text{h}} \right) = 7,7645 - 1,3037 \text{ Altura (m)} + 4,4362 \text{ Presión (bar)} \quad (1.12)$$

Error estándar: 2,072

Coefficiente de correlación: 0,909

Coefficiente de determinación: 0,826

De los parámetros de evaluación del modelo, se observa que la expresión es aceptable para representar el comportamiento de la intensidad en función de la presión y altura en la que se realiza la prueba, además se observa que la altura tiene una relación inversa con la intensidad, mientras que la presión tiene una relación directa. Se observa que la presión tiene una influencia más alta sobre el valor de intensidad, que la altura a la cual se realiza la prueba. Al probar una regresión no lineal entre las opciones incluidas en el software, se

encuentra que el modelo de mejor ajuste es de forma racional, como se presenta a continuación:

$$Intensidad \left(\frac{mm}{h} \right) = \frac{5,5011+2,1671 \text{ Altura (m)}+0,0994 \text{ Presión (bar)}}{1+0,2734 \text{ Altura (m)}-0,3665 \text{ Presión (bar)}} \quad (1.13)$$

Error estándar: 1,3838

Coefficiente de correlación: 0,9693

Coefficiente de determinación: 0,9395

Al realizar una regresión lineal con el coeficiente de uniformidad como la variable de respuesta, se obtiene un modelo con error estándar igual a 7,75; coeficiente de correlación de 0,41 y coeficiente de determinación de 0,17. Se verifica que la uniformidad no presenta ningún tipo de relación lineal con la presión y con la altura a la cual se realizaron los ensayos. Al probar con modelos no lineales, se obtuvo que la mejor expresión era de forma cuadrática con error estándar igual a 8,46; coeficiente de correlación de 0,58 y coeficiente de determinación de 0,34; de esta forma se puede concluir que el coeficiente de uniformidad no presenta relación de ningún tipo con la altura y la presión en la que se realizan los ensayos.

- Segunda configuración de emisores

La primera configuración fue modificada por 4 boquillas en los extremos FL-10VC y dos boquillas FL-5VC en el medio con distancias entre boquillas de 138 cm, usando dos laterales para ubicar tres boquillas en cada lateral (Figura 1-12). Se obtuvieron coeficientes de uniformidad mayores del 77 %, la Figura 1-13 presenta los resultados obtenidos de las pruebas con esta configuración. Para esta configuración se obtuvieron coeficientes de uniformidad que en ningún caso estuvieron por debajo del 78%, es decir como mínimo la lluvia simulada presentó una distribución regular, encontrándose la mayoría en un rango bueno de uniformidad entre 80% a 90%. Sin embargo, al ser pruebas realizadas dentro de un recinto cerrado, sin influencia del viento, se esperaba que la uniformidad llegara hasta valores por encima del 90%, para que la uniformidad en campo no bajara del 80%.

Figura 1-12: Configuración de 6 emisores de distinto caudal (cuatro a los extremos, dos en el centro), en rectángulo.

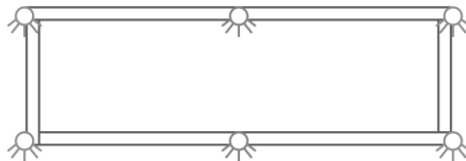
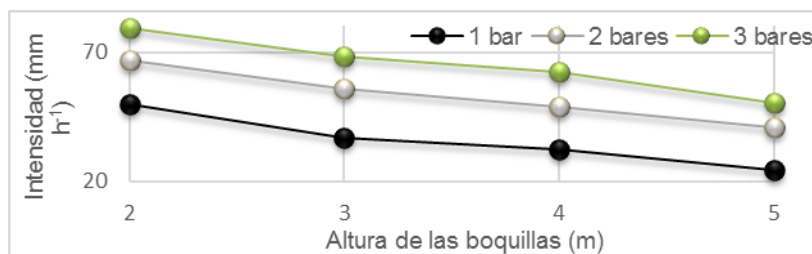


Figura 1-13: Intensidad de lluvia en función de la altura de los emisores y las presiones de trabajo. Para 6 boquillas



Al realizar una regresión lineal sobre los datos obtenidos con esta configuración, expresando la intensidad en mm h^{-1} como una función de la presión de trabajo en bares y la altura de las boquillas en metros, se obtuvo la siguiente expresión, utilizando el software de análisis matemático Curve Expert Professional 2.2.0. Los datos obtenidos en las calibraciones de esta configuración se presentan en la Tabla 1-5.

$$\text{Intensidad} \left(\frac{\text{mm}}{\text{h}} \right) = 52,38 - 8,63 \text{ Altura (m)} + 14,56 \text{ Presión (bar)} \quad (1.14)$$

Error estándar: 2,29

Coefficiente de correlación: 0,99

Coefficiente de determinación: 0,98

Se observa que el modelo lineal presenta parámetros de ajuste que indican que es una expresión adecuada para representar la intensidad como función de la presión y altura de trabajo. Al igual que en la primera configuración se observa una relación inversa con la altura de las boquillas y directa con la presión de trabajo.

Tabla 1-5: Características de la lluvia simulada 6 boquillas

Altura m	Presión bar	CUC %	Intensidad mm h ⁻¹	Diámetro de la gota D50 mm		Velocidad terminal m s ⁻¹		Energía cinética J m ⁻² mm ⁻¹	
				Brandt (1989)	(Pérez <i>et al.</i> , 2003)	(Gunn y Kinzer, 1949)	Beard & Pruppacher (1969)	Gunn & Kinzer (1949)	(Pérez <i>et al.</i> , 2003)
2	1	84,9	49,7	1,02	2,08	4,46	4,00	26,71	9,96
	2	85,2	66,8	1,20	2,51	4,92	4,55	27,83	12,10
	3	86,3	79,4	0,95	1,90	4,23	3,74	28,49	8,95
3	1	79,8	36,8	1,09	2,24	4,64	4,21	25,57	10,76
	2	89,2	56	1,12	2,32	4,72	4,31	27,16	11,16
	3	86,9	68,2	0,91	1,82	4,13	3,63	27,91	8,53
4	1	78,7	32,4	0,82	1,59	3,79	3,27	25,09	7,19
	2	89,3	48,8	0,86	1,70	3,95	3,44	26,64	7,82
	3	84,8	62,3	0,75	1,44	3,54	3,03	27,57	6,28
5	1	80,98	24,5	0,71	1,34	3,37	2,86	24,03	5,68
	2	85,1	40,8	0,67	1,25	3,21	2,72	25,96	5,14
	3	85,8	50,1	0,79	1,53	3,71	3,18	26,74	6,87

En la primera configuración, se realizó una prueba con modelos no lineales, en el que el software utilizado presentó como una mejor opción un modelo racional, al igual que en la primera configuración, se obtuvo que la mejor representación del comportamiento de la intensidad en función de las variables de cambio en el simulador, es de tipo racional, presentando valores más bajos de error estándar y coeficientes de correlación y determinación mayores, indicando una mejor aproximación a la obtención de la intensidad de precipitación simulada, en función de la altura del cuerpo de emisores y la presión de trabajo de la motobomba. La expresión obtenida se presenta en la Ecuación (1.15)

$$Intensidad \left(\frac{mm}{h} \right) = \frac{55,47 - 8,84 \text{ Altura (m)} + 77,75 \text{ Presión (bar)}}{1 + 0,41 \text{ Altura (m)} + 0,53 \text{ Presión (bar)}} \quad (1.15)$$

Error estándar: 1,73

Coefficiente de correlación: 0,99

Coeficiente de determinación: 0,99

Al igual que con la primera configuración se realizó la búsqueda de un modelo de ajuste para el coeficiente de uniformidad en función de la altura de boquillas y la presión de trabajo del equipo, en el caso de la regresión lineal no se obtuvo un modelo adecuado de ajuste, ya que presentó un error estándar de 2,84, un coeficiente de correlación de 0,64 y un coeficiente de determinación de 0,42. Al probar con modelos no lineales, la recomendación del software fue un modelo cuadrático, con error estándar igual a 2,39; coeficiente de correlación de 0,85 y coeficiente de determinación de 0,72; que aunque ya representa un ajuste aceptable, no evidencia una clara relación entre el coeficiente de uniformidad, la presión de trabajo y la altura de las boquillas.

Con el fin de realizar la validación del funcionamiento y operación del equipo, obtenida en laboratorio, se realizaron pruebas en campo con pendientes del 75 y el 35%. El principal problema en cuanto a la construcción del simulador se relacionó con la disposición de una barrera cortaviento. Se emplearon dos materiales: plástico y tela impermeable. El primer diseño consistió en un plástico tipo invernadero colocado en forma de carpa con dimensiones de 6 m de ancho y 15 m largo con dos cruces tipo andamio ubicados en la cercha de apoyo de área de influencia de cada cruz de 1,20 m x 1,40 m (Figura 1-14). Sin embargo, al realizar las pruebas en campo, en una pendiente del 75% se evidenció que era necesario un mejor método de adaptación de la cubierta al equipo de simulación.

Figura 1-14: Primer diseño de barrero cortavientos probado en campo.



La disposición en forma de carpa, aunque facilitaba su instalación interfería con el flujo de las boquillas y requería demasiada área para ser anclada al suelo con una tensión adecuada. En esta primera jornada desarrollada en campo se observó la importancia de

mejorar la portabilidad del equipo para su transporte, y por lo tanto se realizó una nueva configuración de instalación y cambio de uniones por uniones universales que mejoraron sustancialmente el armado y desarmado del simulador al permitir una mejor manipulación en las uniones de manguera y tuberías. Estos cambios consistieron en variar las distancias entre tuberías, por tuberías más largas a la salida de la bomba para facilitar el distanciamiento entre la bomba y las torres elevadoras.

Se probó otra barrera contraviento en forma de cortinas, mediante una tela hidrórepelente e impermeable, de 6 m de ancho y 16 m de largo, la cual iba amarrada a tres varillas soportadas en la cercha de dimensiones de 1,80 m con aberturas por medio de las cuales pasaba una cuerda atravesada en un doblez presentado en la tela. En campo pudo verificarse que, aunque la tela tiene un menor peso y la caída vertical requiere menor área para soportarse, la fuerza del viento puede acarrear peligros para la manipulación del simulador. Se realizó una segunda jornada en campo, en el municipio de Güepsa, Santander, zona productora de caña panelera, en la que se observó que por seguridad de manejo del equipo era conveniente quitar el cortaviento y ampliar el área de mojado para contrarrestar la influencia del viento.

- Tercera configuración de emisores

Como se mencionó en la metodología de las pruebas realizadas, luego de validar la segunda configuración en campo, se decidió mejorar el diseño de la configuración de emisores, con el fin de reducir al máximo el efecto del viento sobre la uniformidad, aun cuando no se utiliza ningún tipo de barrera rompe vientos, además de ampliar el tamaño de gota, y el rango de intensidad a simular. Para este fin se realizó una nueva configuración con 5 boquillas en tres bolillo, como se muestra en la Figura 1-8. Inicialmente se utilizaron aspersores Senninger I mini wobbler, invertidos #8 y #10, los cuales se seleccionaron debido a su baja pérdida por evaporación, múltiples niveles de alcance, caudales con rangos de 170 a 495 l h⁻¹, y presiones operativas de 1,38 a 1,72 bar. Este tipo de boquillas se diferencian por medio de su número el cuál hace referencia a la amplitud del orificio de salida, así la boquilla No. 8, corresponde a 8/64 pul, y la número 10 a 10/64 pul, diámetros correspondientes a la abertura de salida.

Inicialmente se probó la configuración con 5 boquillas #8 a diferentes presiones y alturas de trabajo, con el largo del cuerpo de emisores paralelo al largo de la parcela de medición. Los resultados de los parámetros obtenidos de ensayos realizados en el interior del laboratorio de ensayos hidráulicos de la Universidad Nacional (sin condiciones de viento) para esta configuración se presentan en la Tabla 1-6. Los datos de la misma configuración, en las mismas condiciones, pero con 5 boquillas #10, se presentan en la Tabla 1-6 y en la Tabla 1-7.

Tabla 1-6: Datos obtenidos en pruebas de laboratorio con configuración tres bolillo, 5 boquillas # 8, con antigoteo i-mini Wobbler.

Altura (mm)	Presión salida de la bomba (psi)	Uniformidad (%)	Intensidad (mm h ⁻¹)	Diámetro de la gota (mm)	Velocidad terminal (m s ⁻¹)	Energía cinética (kJ m ⁻²)	Rango diámetro de gota (mm)	
							Inicial	Final
2	18	90,8	25,7	1,11	4,70	24,21	0,20	2,65
2	23	91	30,2	0,74	3,52	24,82	0,19	2,31
2	28	90,8	34,7	0,73	3,45	25,35	0,20	1,90
3	19	88,6	21,2	0,91	4,12	23,48	0,19	1,36
3	24	91,2	24,3	-	-	24,00	-	-
3	29	91	30,6	-	-	24,87	-	-
4	21	91,6	20,2	-	-	23,30	-	-
4	26	91,5	24,5	-	-	24,03	0,11	1,74
4	31	89,7	30,7	-	-	24,88	-	-
5	22	91,9	19,5	0,78	3,65	23,16	0,12	1,40
5	27	90,3	25	0,73	3,47	24,10	0,05	1,91
5	32	90,3	31,2	0,71	3,37	24,94	0,20	1,63
2	10	88,75	31,94	1,10	4,67	25,03	0,20	3,12
2	15	88,54	34,11	-	-	25,28	-	-
2	20	90,66	45,17	-	-	26,35	-	-

Se observa en la Tabla 1-6 y en la Tabla 1-7 que los coeficientes de uniformidad en laboratorio se encuentran muy cercanos al 90%, lo que se presentó como un buen indicio para su comportamiento en condiciones exteriores, sin embargo la máxima intensidad presentada en la configuración corresponde a 45,45 mm h⁻¹, lo que limitaba a simulaciones de lluvia con periodos de retorno cortos.

Tabla 1-7: Datos obtenidos en pruebas de laboratorio con configuración tres bolillo, 5 boquillas # 10, con antigoteo i-mini Wobbler.

Altura (mm)	Presión salida de la bomba (psi)	Uniformidad (%)	Intensidad (mm h ⁻¹)	Diámetro de la gota (mm)	Velocidad terminal (m s ⁻¹)	Energía cinética (kJ m ⁻²)	Rango diámetro de gota (mm)	
							Inicial	Final
2	15	76,56	35,6	-	-	25,44	-	-
2	18	92,07	36,11	-	-	25,50	-	-
2	23	91,86	40,05	-	-	25,89	-	-
2	28	91,96	45,45	-	-	26,37	-	-

Al realizar una regresión lineal sobre los datos obtenidos con esta configuración, expresando la intensidad en mm h⁻¹ como una función de la presión de trabajo en bares, la altura del cuerpo de emisores en metros, y el diámetro de las boquillas en pulgadas, se obtuvo la siguiente expresión, utilizando el software de análisis matemático Curve Expert Professional 2.4.0:

$$Intensidad \left(\frac{mm}{h} \right) = 5,30 - 4,39 \text{ Altura (m)} + 0,50 \text{ Presión (psi)} + 206,17 \text{ Diámetro (pul)} \quad (1.16)$$

Error estándar: 5,17

Coefficiente de correlación: 0,79

Coefficiente de determinación: 0,62

El modelo lineal presenta parámetros que indican cierta incertidumbre en la representación adecuada de los ensayos por medio de la expresión, sin embargo, se observa que la presión de salida de la bomba y el diámetro de apertura de la boquilla, presentan una relación directa con la intensidad, mientras que la altura, tiene una relación inversa con la intensidad. Al realizar el mismo procedimiento, pero ahora obteniendo la uniformidad como variable de respuesta se obtiene un modelo lineal, con un coeficiente de correlación inferior a 0,5, por lo tanto, no se evidencia una relación entre la uniformidad, la altura de emisores, el diámetro del orificio de las boquillas, y la presión de salida de la bomba.

1.3.3 Diseño final

Al modificar la segunda configuración de emisores, y trabajar con una acomodación en tres bolillo, se logró aumentar la uniformidad de aplicación sobre la parcela, sin embargo, con las boquillas seleccionadas, disponibles en el mercado, no se logró superar $45,45 \text{ mm h}^{-1}$, por lo cual se vio la necesidad de tener boquillas que permitieran mayor caudal y mayor tamaño de gota, permitiendo una intensidad más representativa de una lluvia acorde a la zona. Por esta razón se seleccionaron aspersores Senninger I Wob up3, #14, #18 y #21 $\frac{1}{2}$, los cuales se instalaron en las cuatro esquinas del cuerpo de aspersores, dejando en el centro un aspersor I Mini Wobbler #10, como los utilizados en la configuración anterior. Estos aspersores, al tener una amplitud mayor en el orificio de salida de sus boquillas, permitieron obtener mayor tamaño de gota y mayor caudal de aplicación, al igual que en los aspersores anteriores el número indica el numerador de una fracción cuyo denominador siempre es 64, y el resultado de esta división expresa el diámetro de apertura de la boquilla en pulgadas.

Para esta última configuración, la cual se seleccionó como la más adecuada, se hizo necesario colocar perpendicularmente el largo del cuerpo de emisores y el largo de la parcela de escorrentía. De esta forma el largo del simulador se ubicó siempre en sentido perpendicular a la pendiente, de tal forma que la parcela de escorrentía quede en campo en el mismo sentido de la pendiente. Las pruebas de calibración de esta configuración se llevaron a cabo en condiciones exteriores, en un lote aledaño a las instalaciones del Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, con variaciones de presión, altura de emisores, y cambios de boquilla, relacionados con distintos diámetros de salida (#14 = $14/64$ pul, #18 = $18/64$ pul, #21 $\frac{1}{2}$ = $21,5/64$ pul). Los registros de laboratorio de las distintas configuraciones se presentan en el Anexo A, los datos se presentan en la Tabla 1-8, para emisores a 5 m de altura, la Tabla 1-9, para emisores a 4 m de altura, la Tabla 1-10, para emisores a 3 m de altura y a 2 m de altura se presentan en la Tabla 1-11. Se observa en las Tablas 1-8 a la 1-11 que los coeficientes de uniformidad en condiciones exteriores siempre superaron el 80%, indicando un buen comportamiento en presencia de viento moderado. Además, se observan intensidades desde $24,21 \text{ mm h}^{-1}$, hasta $99,14 \text{ mm h}^{-1}$, lo cual representa un rango de intensidades mucho más amplio, que en las tres configuraciones presentadas anteriormente

Tabla 1-8: Datos configuración perpendicular, aspersores i-wob up3 en los extremos a 5 m de altura.

Presión (psi)	Uniformidad (%)	Intensidad (mm h ⁻¹)	Diámetro de la gota (mm)	Rango diámetro de gota (mm)	Velocidad terminal m s ⁻¹	Energía cinética kJ m ⁻²
Boquilla No. 14						
13	82,24	26,33	2,12	0,17-3,4	6,60	24,44
16	82,01	24,84	1,80	0,21-2,67	6,12	24,13
19	81,76	23,28	1,43	0,18-2,98	5,44	24,71
Boquilla No. 18						
14	81,88	49,25	1,11	0,18-3,48	4,70	26,72
17	81,26	35,74	2,23	0,17-2,58	6,75	25,52
20	83,69	28,96	1,51	0,22-5,7	5,60	23,98
Boquilla No. 21 ½						
18	81,45	65,72	0,85	0,11-1,2	3,92	27,81
21	80,63	58,70	1,21	0,27-3,54	4,95	27,42

Tabla 1-9: Datos configuración perpendicular, aspersores i-wob up3 en los extremos a 4 m de altura.

Presión (psi)	Uniformidad (%)	Intensidad (mm h ⁻¹)	Diámetro de la gota mm	Rango diámetro de gota mm	Velocidad terminal m s ⁻¹	Energía cinética kJ m ⁻²
Boquilla No. 14						
12	83,23	33,03	2,44	0,49-2,36	4,83	15,28
15	81,54	30,81	2,35	0,18-2,35	4,75	15,14
18	81,96	26,82	6,02	0,32-4,78	6,76	18,71
Boquilla No. 18						
12	84,56	50,06	2,61	0,29-3,5	7,21	19,51
15	83,62	44,76	3,82	0,23-4,56	8,33	21,49
18	84,66	41,94	4,38	0,24-6,3	8,73	22,21
Boquilla No. 21 ½						
15	80,86	78,76	5,07	0,22-5,79	9,16	22,97
18	85,59	65,34	3,66	0,26-2,12	8,21	21,28

Tabla 1-10: Datos configuración perpendicular, aspersores i-wob up3 en los extremos a 3 m de altura.

Presión (psi)	Uniformidad (%)	Intensidad (mm h ⁻¹)	Diámetro de la gota mm	Rango diámetro de gota mm	Velocidad terminal m s ⁻¹	Energía cinética kJ m ⁻²
Boquilla No. 14						
11	88,33	36,47	3,76	0,21-4,8	8,28	25,54
14	83,24	32,53	1,71	0,20-2,48	5,97	25,17
17	81,12	32,32	2,12	0,26-3,66	6,60	25,08
Boquilla No. 18						
11	81,13	66,70	3,7	0,27-6,08	8,24	27,88
14	85,82	58,97	5,47	0,23-8,14	9,38	27,36
17	88,34	55,35	3,37	0,13-4,55	7,96	27,12
Boquilla No. 21 ½						
17	81,77	88,16	2,3132	0,24-3,89	6,86	29,05

Tabla 1-11: Datos configuración perpendicular, aspersores i-wob up3 en los extremos a 2 m de altura.

Presión (psi)	Uniformidad (%)	Intensidad (mm h ⁻¹)	Diámetro de la gota mm	Rango diámetro de gota mm	Velocidad terminal m s ⁻¹	Energía cinética kJ m ⁻²
Boquilla No. 14						
12	86,42	40,36	2,38	0,23-4,23	6,94	25,92
15	81,88	39,97	1,8	0,20-3,06	6,12	25,89
18	81,02	36,52	1,58	0,21-3,18	5,74	27,75
Boquilla No. 18						
12	82,26	76,28	2,39	0,21-3,00	6,95	28,37
15	81,95	71,63	1,78	0,19-2,86	6,09	28,15
18	87,63	65,42	2,32	0,18-3,22	6,87	25,63

Al realizar una regresión lineal sobre los datos obtenidos con esta configuración, expresando la intensidad en mm h⁻¹ como una función de la presión de trabajo en psi, la altura del cuerpo de emisores en metros, y el diámetro de las boquillas en pulgadas, se

obtuvo la siguiente expresión, utilizando el software de análisis matemático Curve Expert Professional 2.4.0:

$$\text{Intensidad} \left(\frac{\text{mm}}{\text{h}} \right) = -10,66 - 7,30 \text{ Altura (m)} - 1,33 \text{ Presión (psi)} + 398,42 \text{ Diámetro (pul)} \quad (1.17)$$

Error estándar: 5,28

Coefficiente de correlación: 0,96

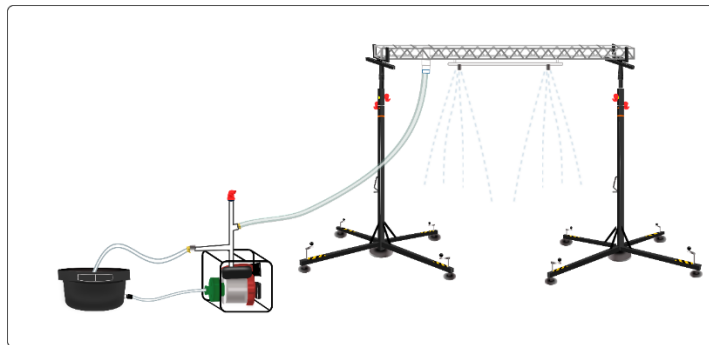
Coefficiente de determinación: 0,93

Se observa que el modelo lineal presenta parámetros que indican un buen ajuste en la representación de la intensidad de precipitación como función de la altura, la presión y el diámetro de boquilla. Con respecto a las ecuaciones obtenidas en las configuraciones anteriores se observa que no solo la altura tiene una relación inversa con la intensidad simulada, sino en este caso también la presión presenta este comportamiento, y esto se debe a que a mayor presión el radio de apertura de los aspersores es mayor, provocando una menor caída de agua en el área de la parcela de escorrentía. Por su parte el diámetro de apertura de la boquilla, expresado en pulgadas, tienen una relación directa con la intensidad de precipitación. Al realizar el mismo procedimiento, pero ahora obteniendo la uniformidad como variable de respuesta se obtiene un modelo lineal, con un coeficiente de correlación inferior a 0,5, por lo tanto, no se evidencia una relación entre la uniformidad, la altura de emisores, el diámetro del orificio de las boquillas, y la presión de salida de la bomba.

Esta configuración fue probada también en condiciones de pendiente, similares a las esperadas en la zona de estudio, en el que se verificó que se haya cumplido con una distribución mayor de la intensidad de la lluvia sobre la parcela de escorrentía, con el fin de garantizar una aplicación uniforme sin la utilización de una barrera contraviento. Además, se verificó que se cumplían objetivos que se fueron identificando en el desarrollo de las pruebas de las distintas configuraciones propuestas, de esta forma se obtuvo un rango de intensidad más amplio, un coeficiente de uniformidad por encima de 80% en condiciones exteriores, sin la necesidad de utilizar una cortina rompe vientos, y un tamaño de gota mayor.

Un esquema del diseño final se presenta en la Figura 1-15. El equipo consta de un tanque de almacenamiento de 1000 l (en las mediciones correspondientes a este estudio, se utilizó siempre un tanque de 2000 l), una motobomba (se trabajaron dos potencias, una motobomba de 5 HP y otra de 7 HP), 2 soportes metálicos de 1,95 m de altura mínima (alcanzan alturas de hasta 4 y 5 m), 1 cercha metálica desarmable en tres divisiones de 2 metros, un marco de tuberías en PVC para instalación de 5 boquillas de aspersion, juego de 5 boquillas, aproximadamente 6 m de manguera de alta presión, distintos elementos de acople, uniones, codos y demás, 12 m de lámina de acero galvanizada de 15 cm de ancho, doblada y cortada en segmentos de 1,5 m, la cual forma la parcela de escorrentía, y un tanque de recolección con 50 l de capacidad.

Figura 1-15: Esquema diseño final simulador de lluvia.



2. Evaluación del efecto de distintos valores de intensidad sobre las pérdidas del suelo, en los diferentes sistemas de corte del cultivo de la caña panelera.

El uso del suelo en Colombia es diverso gracias a las condiciones geográficas, climáticas y orográficas, que permiten obtener beneficios de recursos naturales, como es el caso de la producción agrícola; sin embargo, el uso y aprovechamiento de los recursos por parte del hombre, generan degradación en el suelo debido a distintos fenómenos entre los que se encuentran la erosión, la desertificación y la salinización. A nivel nacional la erosión es el problema más importante a tener en cuenta debido a su magnitud (SIAC, 2015). Las proyecciones mundiales sobre el fenómeno erosivo son alarmantes, se calcula que, al actual ritmo de degradación de suelos, la superficie cultivable del planeta pasará de los 1500 millones de hectáreas que había en 1975 a 1000 millones de hectáreas en el año 2025, es decir que la pérdida de suelos afectará posiblemente a una tercera parte de la superficie arable de la tierra (Myers, 1987). En Colombia aún no se tiene claro cuál es el volumen de suelos que se pierde por año debido al conjunto de actividades agropecuarias y las estimaciones realizadas por las diferentes entidades encargadas de suministrar esta información son muy variables entre sí (IDEA, 2015), por lo que es importante llevar a cabo estudios a nivel regional, que incluyan variables de control del fenómeno, como la cobertura, el sistema de manejo del cultivo establecido, y variables propias de la región a estudiar como la precipitación, la pendiente y el tipo de suelo.

La erosión hídrica superficial es uno de los factores de degradación de suelos más importantes a causa del área que cubre y de los efectos que tiene sobre la producción agrícola. Aunque la erosión es un proceso natural, que permite el desarrollo y el transporte de nutrientes, hacia zonas agrícolas de alto potencial productivo, se puede acelerar por procesos antrópicos, llevando al suelo a niveles de degradación en los que el desarrollo

de cualquier sistema vegetal sería muy difícil. La erosión hídrica superficial es un fenómeno que inicia con la producción de la dispersión de los agregados del suelo en sus partículas elementales (texturales), donde puede formarse una costra superficial o un sellado que impide una adecuada infiltración del agua generando la pérdida de suelo por escorrentía superficial (Ibañez, 2006). Existen diversos factores asociados al uso y el manejo del suelo que favorecen el desarrollo de eventos relacionados con la pérdida de suelo por la acción de la lluvia adicional a los factores antrópicos, como los factores naturales, el relieve y características propias del suelo (Oñate & Valdivieso, 2004). Un grado excesivo de erosión puede agotar las reservas de nitrógeno y fósforo, necesarios para el crecimiento de las plantas, y degradar el suelo a tal punto que la vida vegetal sería imposible de sostener (Neitsch *et al.*, 2005). La erosión conduce a la pérdida de partículas finas de suelo, permitiendo el afloramiento de capas que presentan limitantes para el desarrollo de cultivos. En condiciones extremas, también conlleva a la remoción de semillas, plántulas y fertilizantes, a la reducción de la capacidad de almacenamiento de agua e incremento de la escorrentía, a la formación de cárcavas y al movimiento de grandes masas de suelo debido a la gravedad, todo lo anterior se traduce en términos económicos a la pérdida del valor de la tierra (Lobo, 2015).

La existencia de diversos métodos y modelos para la predicción, evaluación y medición de la erosión hídrica superficial permite entender el comportamiento de dicho fenómeno, y establecer recomendaciones de manejo y control para reducir su efecto negativo sobre el desarrollo de cultivos. Sin embargo, las condiciones de distintas regiones, con diversas prácticas de manejo de los cultivos, hacen necesario ajustar las metodologías y modelos existentes, para que se aproximen a las condiciones reales sobre las cuales se quiere trabajar. La información importante respecto a la erosión del suelo, sobre muchas escalas de tiempo y espacio es esencial para evaluar la severidad del fenómeno y para diseñar estrategias efectivas para la conservación del suelo y la producción sostenible de cultivos (Benmansour *et al.*, 2013).

En el caso específico del cultivo de caña de azúcar para la producción de panela, los valores de pérdida de suelo no se encuentran establecidos para condiciones propias del sistema, con relación al tipo de corte, al estado fenológico o la época del cultivo, y no se conoce el efecto de la intensidad de precipitación, debido a la dificultad de medir pérdidas

de suelo en distintos niveles de intensidad de precipitación. Se establece como hipótesis inicial la existencia de un tipo de sistema de corte que ofrece la mejor protección ante eventos de escorrentía superficial. En este sentido, se busca establecer para una región específica de producción de caña de azúcar para panela, que presente los dos sistemas de corte tradicionalmente utilizados en Colombia, valores de coeficientes de pérdida de suelo en kilogramos por hectárea. Se presenta la comparación de valores de pérdida de suelo entre dos sistemas específicos de corte en la caña panelera, por una parte, el corte por entresaque, tradicionalmente utilizado en Cundinamarca y el corte por parejo, el cual ha tomado una gran importancia en el departamento. Además, se tiene en cuenta la comparación de factores asociados a la pendiente, al grado de desarrollo de la planta y a la intensidad de la lluvia, así como las demás covariables de importancia en términos de caracterización física y química de los suelos en los cuales se llevaron a cabo las mediciones.

2.1 Estado del arte

Factores físicos como el clima, topografía, la cobertura y las características específicas del suelo, tienen efectos importantes sobre los procesos de erosión y formación del suelo (Gobin, 2004). Cuando el agua es inicialmente aplicada a un suelo seco, el índice de infiltración es alto, sin embargo, reducirá a medida que el suelo se vuelve más húmedo. Cuando la cantidad de agua recibida o aplicada al suelo es mayor que la infiltración básica del suelo, los poros superficiales se comienzan a llenar. Si dicha cantidad de agua continúa siendo mayor a la infiltración básica, una vez el agua ocupe todo el espacio poroso del suelo, inicia la escorrentía superficial (Neitsch *et al.*, 2005).

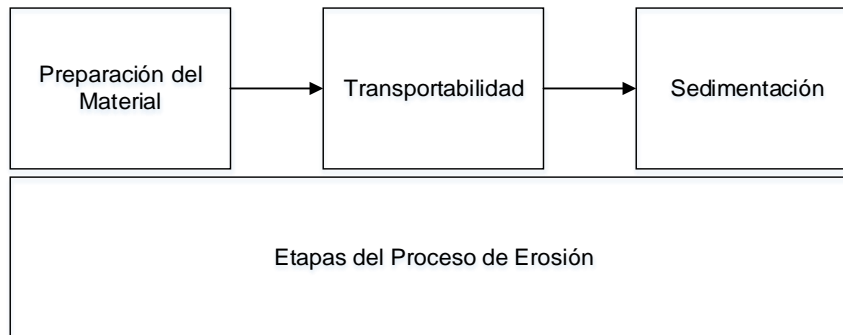
La importancia de la escorrentía superficial se ha evidenciado no solo en términos del transporte de partículas de suelo, sino de otros insumos agrícolas como nitratos, fosfatos y pesticidas, los cuales podrían estar agregados como partículas o en solución y que pueden terminar en cauces de agua (Evans, 2010). Por su parte, Parson & Foster (2013) indican que una observación común en suelos agrícolas en Europa muestra que la escorrentía ocurre incluso con lluvias poco intensas, especialmente en suelos saturados o cerca a este nivel. La erosión del suelo y la redistribución de partículas asociada a este

proceso, impulsada por el agua y el viento, son procesos naturales que pueden ser acelerados por actividades antrópicas, por el cambio en el uso de la tierra, una mala gestión agrícola, la deforestación y el sobrepastoreo (Dercon *et al.*, 2012).

Cuando la erosión es por el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo, produce dispersión de los agregados en sus partículas texturales. Puede formarse una costra superficial o un sellado que impide una adecuada infiltración del agua generando pérdida del suelo por escorrentía superficial (Ibañez, 2006). Existen diversos factores asociados al uso y el manejo del suelo que favorecen el desarrollo de eventos relacionados con la pérdida de suelo por la acción de la lluvia, adicional a los factores antrópicos, se suman factores naturales como las pendientes pronunciadas (Oñate & Valdivieso, 2004). La erosión conduce a la pérdida de partículas finas de suelo, permitiendo el afloramiento de capas de suelo que presentan limitantes para el desarrollo de cultivos. En condiciones extremas, también conlleva a la remoción de semillas, plántulas y fertilizantes, a la reducción de la capacidad de almacenamiento de agua e incremento de la escorrentía, a la formación de cárcavas y al movimiento de grandes masas de suelo debido a la gravedad (Ibañez, 2006).

Un grado excesivo de erosión puede agotar las reservas de nitrógeno y fósforo del suelo, necesarios para el crecimiento de las plantas, por lo tanto, puede degradar el suelo a tal punto que la vida vegetal sería imposible de sostener (Neitsch *et al.*, 2005). La aceleración del proceso de erosión es un problema, ya que los materiales perdidos no se recuperan en las zonas erosionadas y en las zonas que reciben los aportes no son aprovechados o se pierden (CRIE, 2005). El fenómeno de erosión hídrica se divide en tres etapas como se representa en la Figura 2-1. Cada una de las etapas del proceso erosivo produce daños importantes: En la etapa de preparación del material o separabilidad se produce la alteración de la estructura superficial del suelo, destrucción de agregados, formación de costras y sellos, alteración de la relación entre la infiltración y el escurrimiento, así como la pérdida de fertilidad del suelo, en la etapa de transportabilidad se completa la pérdida de las partículas del suelo iniciada en la etapa previa, se genera el escurrimiento superficial del agua que produce distintas formas de erosión y daños en la infraestructura, para la última etapa de sedimentación, se produce una disminución de la energía de escurrimiento que conduce al depósito de las partículas de suelo (Lobo, 2015).

Figura 2-1: Etapas del proceso de erosión



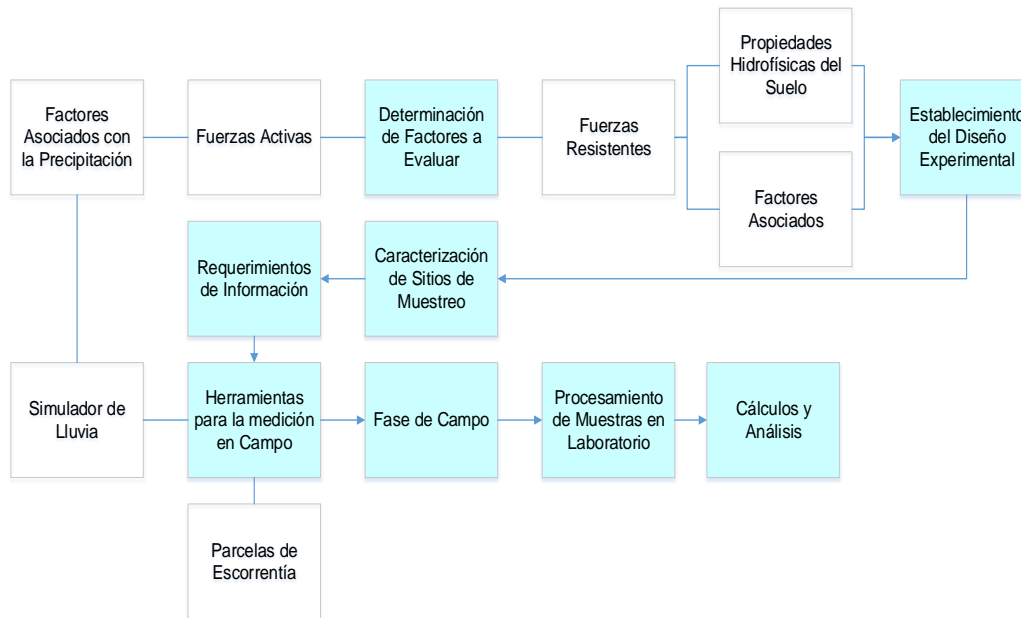
2.2 Aspectos metodológicos

Para la evaluación de erosión hídrica superficial se utilizó un método directo, que consiste en la evaluación de la pérdida de suelo en unidades experimentales instaladas en campo. Se elaboró un protocolo para la evaluación de la erosión hídrica superficial en condiciones de pendiente, diferentes sistemas de corte y fases fenológicas del cultivo. El protocolo se definió con base en la revisión de distintas metodologías definidas para la medición de erosión hídrica superficial y a las condiciones específicas del cultivo de caña panelera. La estructura metodológica se presenta en la Figura 2-2, y los principales componentes se describen a continuación.

2.2.1 Determinación de los factores a evaluar y establecimiento del diseño experimental

De acuerdo con el interés de investigación y al sistema productivo en el cual se busca evaluar la pérdida de suelo, se seleccionan aquellas variables que se consideran asociadas a la erosividad (fuerzas activas) y erodabilidad (fuerzas resistentes) del suelo, así como los factores de variación relacionados con el relieve, el uso y el manejo del suelo.

Figura 2-2: Estructura metodológica propuesta.



- **Fuerzas Activas**

En el caso de la erosión hídrica, la fuerza externa que produce la separación de los agregados del suelo es la lluvia. De esta forma los factores asociados a la erosividad del suelo corresponden a la intensidad de precipitación, la duración, y el tamaño de gotas, para ensayos que se realizan en condiciones naturales. En estudios que se realizan bajo la aplicación de lluvia simulada, se permite variar los factores asociados a la precipitación, con el fin de comparar los niveles de suelo perdido, con relación a distintas características asociadas a eventos de precipitación. Para el análisis de las series históricas de precipitación se empleó la metodología de curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia con el fin de asociar la intensidad máxima con la duración de la lluvia y la probabilidad de ocurrencia o tiempo de retorno, como se presentó en el diseño del simulador del capítulo anterior.

De esta forma se seleccionaron en el equipo tres tamaños de boquilla distintos, el primero de 5,56 mm de apertura, el cual simula una intensidad de lluvia aproximada de 30,81 mm hora⁻¹, correspondiente a una intensidad de 30 minutos (I_{30}), con un período de retorno de

0,2 años, según la curva de intensidad frecuencia duración presentada en la Ecuación (1.2), obtenida en el capítulo anterior. La segunda boquilla tiene una apertura de 7,14 mm simula un valor de intensidad de lluvia aproximado de 44,76 mm hora⁻¹, correspondiente a una intensidad de 30 minutos (I_{30}), con un período de retorno de 2,45 años, según la curva de intensidad frecuencia duración. Y una tercera intensidad de precipitación de 78,76 mm hora⁻¹, correspondiente a una I_{30} con un período de retorno de 105,89 años, según la curva de intensidad frecuencia duración, simulada con una boquilla de apertura de 8,53 mm.

- Fuerzas Resistentes

La erodabilidad del suelo está relacionada con las propiedades físicas y algunas propiedades químicas del mismo. Por esto, la caracterización de las propiedades hidrofísicas y químicas del suelo, se consideran importantes en la determinación, evaluación y predicción de pérdida de suelo. Para evaluar la disponibilidad de material erosionable, las variables que se consideran más importantes son la textura, la estructura superficial, en cuanto a firmeza y tamaño, y la estabilidad estructural, en especial en los 5 primeros centímetros de profundidad. Respecto a la presencia de flujo superficial, es importante evaluar propiedades asociadas a la compactación superficial, a la velocidad de infiltración, la retención de humedad en el perfil del suelo, la macroporosidad, la permeabilidad y el contenido de humedad antecedente, asociado con la condición de drenaje.

- Factores Asociados

- Pendiente: Es uno de los factores más importantes en la determinación y predicción de la erosión hídrica superficial, ya que se asocia directamente con el desplazamiento de partículas de suelo, en dirección al movimiento del agua de escorrentía. En campo se tuvo en cuenta el grado de inclinación, midiéndolo en cada una de las parcelas de medición, con el uso de un clinómetro. Otra propiedad importante de la pendiente es la longitud de la misma, la cual en todas las parcelas de escorrentía correspondía a 4,7 m.

- Sistema de manejo: En el caso de estudios específicos, como el caso que corresponde al presente estudio, en caña panelera, el sistema de corte se asocia directamente con la cobertura que ofrecen las plantas al suelo, hacia eventos fuertes de precipitación, así como la cantidad de raíces presentes en los horizontes superficiales. En este caso se pueden comparar distintos usos de suelo, o distintos tipos de manejo. También se puede considerar la etapa fenológica del cultivo en el que se realicen las mediciones. Con el fin de comparar los dos sistemas de corte utilizados en el cultivo de caña panelera, se identificaron lotes que se manejan en corte por entresaque y en corte por parejo, dentro de una misma finca, buscando reducir en algún grado la variabilidad presente por tipo de suelo y condiciones climáticas. Además, en la misma finca se identificó un lote al que se le iba a realizar una primera siembra de caña (plantilla). Otro factor importante es el grado de desarrollo del cultivo, en el que se realizan las mediciones. Para el caso específico de este estudio, se iniciaron las mediciones después del corte y se llevaron a cabo mediciones a los tres meses y a los seis meses, momento en el que se estima que el cultivo ya ha cerrado calles.
- La cobertura vegetal en términos de porcentaje o cantidad por unidad de área es otro de los factores importantes a tener en cuenta en la determinación de la erosión hídrica superficial, en especial para el proceso de infiltración y por ende en la formación de escorrentía superficial, además de brindar protección al suelo ante el golpe de gotas de lluvia. En este caso se realizó la medición de cobertura vegetal sobre el suelo, en cada una de las parcelas de escorrentía antes de cada evento de precipitación a simular, en un cuadro de 50 cm de lado, se registró el peso en húmedo de la cobertura presente en dicho cuadro, y el peso seco, además, se tomó una fotografía para procesarla en el software SamplePoint desarrollado por el USDA, de dónde se estimó un índice de cobertura en términos de porcentaje. Por otra parte, se evaluó el rendimiento en cada uno de los lotes donde se llevaron a cabo las mediciones, tomando tres cuadros de 5 m de lado, en los que se midió el peso de hojarasca, el peso de tallos molibles, el peso de cogollos, el número de cogollos y el número de plantas en pie (en el caso de entresaque).

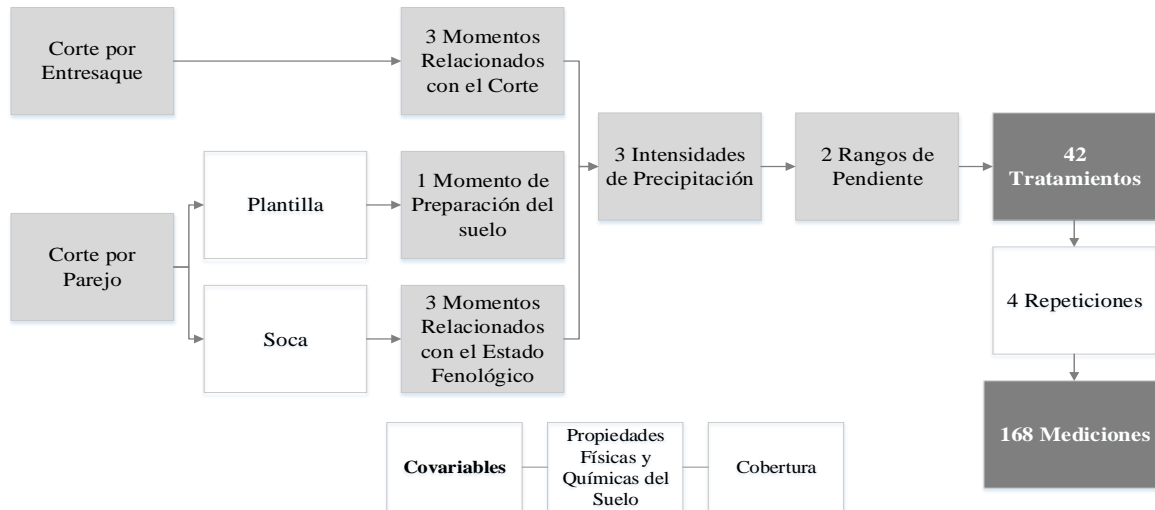
- Diseño experimental

Al tener las definiciones anteriores, se procede a seleccionar aquellos factores que se consideren fuentes de variación para evaluar el fenómeno de erosión hídrica superficial, en el caso del cultivo de caña para la producción de panela. En este estudio se estableció como principal factor de interés, el tipo de corte, con el fin de establecer diferencias entre pérdidas de suelo en cultivos por parejo y por entresaque, teniendo como testigo una plantilla en su estado cero, es decir un lote recién preparado y sembrado con caña panelera.

En cuanto al cultivo, otro factor que se estudia es el asociado al tiempo, en este caso, se evaluaron lotes por entresaque y parejo recién cortados, a los tres meses del corte, y a los seis meses del corte, momento en el que ya han cerrado calles. De igual manera, se consideran variables asociadas con características hidrofísicas de la región de estudio, se incluyen como factores de variación dos rangos de pendiente, uno llamado pendiente suave, correspondiente a pendientes del 10 al 25% y otro denominado pendiente fuerte, correspondiente a pendientes entre el 35 y el 50%, y tres niveles de intensidad de precipitación, simulados con el uso de boquillas con tres tamaños distintos de abertura.

De esta forma se define un diseño estadístico en parcelas sub-divididas, teniendo como factor principal de selección el tipo de corte, como factor secundario la pendiente, y como factor de sub-división el tipo de boquilla utilizado, asociado con la intensidad de precipitación. Adicionalmente se realizan mediciones repetidas en el tiempo, en tres momentos asociados al corte, a saber: después del corte, momento intermedio (a los tres meses del corte) y momento antes del corte (a los seis meses del corte, asociado con el cierre de calles, de dónde se espera que la cobertura ofrecida por la planta al suelo ya no varía significativamente hasta el próximo corte). El diseño explicado anteriormente se presenta en la Figura 2-3.

Figura 2-3: Diseño metodológico de factores a evaluar para la medición de erosión hídrica superficial.



2.2.2 Caracterización de los sitios de muestreo

El establecimiento de los sitios en los que se realiza el muestreo correspondiente a la medición de erosión hídrica superficial tiene en cuenta evaluar sitios que se consideren representativos dentro de las actividades asociadas al uso de la tierra en la región de estudio. La selección de sitios de muestreo corresponde a la definición que se realiza de factores asociados. Por esto, se plantea un diseño que incluye factores asociados a la precipitación, a la pendiente, al sistema de corte (en el caso de caña de azúcar para la producción de panela) y al estado de crecimiento del cultivo. Distintas características asociadas al planteamiento inicial de los factores a evaluar, en cuanto a la diferenciación de aquellos que se consideraron fuente de variación y los que se tienen en cuenta como covariables, definieron la selección del lote en el cual se realizarán los ensayos.

De acuerdo con información obtenida del proyecto “Caracterización técnica y socioeconómica de sistemas regionales de producción de panela” de CORPOICA, se identificaron en Cundinamarca algunos productores que manejaban simultáneamente en su finca cortes por entresaque y por parejo. Se tomó la decisión de trabajar con alguno de estos productores, ya que de esta forma se reducía un poco la variación en tipo de suelo,

condiciones climáticas y demás covariables que pudieran afectar los resultados finales de pérdida de suelo. La finca seleccionada se encuentra ubicada en las coordenadas geográficas 5°6'50,53" de latitud Norte, 74°18'9,28" de longitud Oeste y altitud de 932 msnm, en el municipio de Quebradanegra, Cundinamarca, en dónde se registra una temperatura promedio anual de 21°C y una precipitación anual de 1628 mm.

Para la selección de los lotes, el factor inicial que se tuvo en cuenta fue el tipo de corte que se realiza en el mismo, de esta forma para diferenciar las prácticas de manejo en cuanto a corte se define si el sitio es manejado por entresaque o parejo, en esta última condición se diferenció un lote en el que se realiza el establecimiento del cultivo por primera vez (plantilla) de aquellos que ya han tenido por lo menos un corte previo (soca). Con la definición del sistema de corte, se establecen propiedades referentes al relieve del lote, específicamente las características de la pendiente. Este factor, fundamental para la evaluación de la pérdida de suelo, se expresa en el grado de inclinación, el cual se debía encontrar entre los rangos definidos en el establecimiento de factores a evaluar. De esta forma se definieron seis lotes delimitados a saber: Parejo con pendiente suave, parejo con pendiente fuerte, entresaque con pendiente suave, entresaque con pendiente fuerte, plantilla con pendiente suave y plantilla con pendiente fuerte. En la Figura 2-4 se muestra la distribución de las parcelas experimentales en dónde se realizaron las mediciones.

De cada una de las parcelas se tomaron cuatro muestras de suelo, para determinación de propiedades físicas y una mezcla entre estas muestras para análisis de propiedades químicas del horizonte superficial. Se realizó una medición de velocidad de infiltración en cada parcela, con el uso de anillos de infiltración en campo. Además, se realizó la descripción del perfil característico de suelo y se realizaron observaciones de verificación. En cada lote se realizó una medición de rendimiento, peso de cogollos, de hojarasca, y de tallos molibles como se mencionó anteriormente. se identificó el tipo de suelo. Finalmente, al tener la caracterización y las observaciones del lugar de ensayo se llevaron a cabo las distintas mediciones para evaluar el total de asociaciones posibles entre los factores de variación y la pérdida de suelo.

Figura 2-4: Distribución de parcelas experimentales en la finca en la que se realizaron mediciones de erosión hídrica superficial.



2.2.3 Herramientas para la medición en campo

Corresponde a la definición de instrumentos que se utilizan para realizar las mediciones de pérdida de suelos según el diseño especificado en los lotes seleccionados. En este caso se realizó el diseño y la construcción del Simulador de Lluvia, la parcela de escorrentía, y el colector de agua de escorrentía, además de todos los elementos que los componen.

- Parcelas de Escorrentía

Una forma de facilitar la medición de pérdida de suelo en términos de unidad de área consiste en aislar una porción de suelo por medio de la instalación de láminas que permitan además dirigir el agua perdida por escorrentía hacia un mismo punto, facilitando la recolección del material arrastrado por el agua. En este tipo de instalaciones se recomienda además tener una mayor longitud en el sentido de la pendiente, en algunos estudios se habla del doble de longitud en el sentido de la pendiente, con respecto a la

otra dimensión. Se recomienda el uso de materiales resistentes, ya que una parte de las láminas se encuentra enterrada en el suelo.

Una definición más técnica suministrada por el IGAC (2010), las define como “*porciones de terreno de tamaño variable, limitadas por paredes que aíslan completamente el agua de escorrentía, evitando el paso de esta hacia afuera como hacia adentro de la parcela. El agua que escurre hacia el final es concentrada en un embudo colocado en la base, de donde por medio de una canal pasa a uno o varios tanques donde se recolectan las muestras para el análisis. La determinación de la cantidad de suelo contenido en los tanques variará con su tamaño*”. En la Figura 2-5, se presentan las herramientas para la medición de erosión hídrica superficial en campo, que se han adaptado a las condiciones del cultivo de caña de azúcar para la producción de panela, y al diseño experimental presentado previamente.

Figura 2-5: Simulador de lluvia y parcela de escorrentía, adaptados a cultivo de caña panelera.



2.2.4 Fase de campo

En esta etapa de trabajo se inició con la selección de lotes dentro de la finca ubicada en el municipio de Quebradanegra, Cundinamarca, perteneciente a la zona característica productora de panela del departamento, en dónde se manejan lotes en corte por parejo y

entresaque simultáneamente, a distancias cortas entre sí. Se realizó una caracterización como se explicó anteriormente. Se determinaron distintas propiedades químicas y físicas de suelos de los lotes seleccionados, según las metodologías que se presentan en la Tabla 2-1.

En cada lote establecido, de acuerdo con la combinación de corte y pendiente, se definieron cuatro parcelas, correspondientes a cuatro repeticiones, en cada una de las cuales se tomaron mediciones con las 3 boquillas, simulando los tres valores de intensidad de precipitación definidos. Las primeras mediciones se llevaron a cabo después del corte, y luego se trabajaron en las mismas parcelas a los tres y a los seis meses. Se realizó una única medición en plantilla, en suelo recién preparado, utilizando este valor como un testigo del caso más crítico en el que el suelo no tiene ningún tipo de cobertura vegetal. Se midió la humedad del suelo al inicio de cada ensayo, la pendiente y la cobertura, para un total de 168 mediciones o unidades experimentales. Al término de cada medición se llevó a cabo la recolección de muestras de suelo perdido por escorrentía superficial, y la medición del volumen de agua perdido por escorrentía. Para este fin, al momento de realizar las mediciones con el simulador, en cada ensayo realizado en campo, se instaló una parcela en acero inoxidable con dimensiones de 4x2 m, la cual se desmontaba al terminar el ensayo y se reutilizaba en las mediciones siguientes.

La salida de la parcela tiene una forma de embudo, en la que se adaptó un agujero, al nivel del suelo, con el fin de permitir la salida del agua de escorrentía y el suelo arrastrado por la misma. Se instaló un recipiente recolector enterrado en el suelo, adaptado a la salida de la parcela, con el fin de recoger el agua de escorrentía y el suelo arrastrado por la misma. El tiempo de simulación de la precipitación que se llevó a cabo correspondió a 15 min, al cabo del cual se obtenía la mezcla suelo-agua recogida por el recipiente recolector. Se realizó una medición del volumen en litros, del agua escurrida, y se llevaba a laboratorio una muestra promedio de 500 ml, homogénea con el fin de garantizar una buena representación de la cantidad de suelo, que se arrastraba por escorrentía superficial. Antes de cada medición se recogió una muestra de suelo, con el fin de establecer la humedad del mismo, y en cada parcela se tomó la cantidad de cobertura vegetal de un cuadro de 50 cm de lado, y una fotografía del mismo. En la Figura 2-6, se presentan imágenes tomadas

en campo del equipo instalado. La representación esquemática de la fase de campo se presenta en la Figura 2-7.

Tabla 2-1: Propiedades físicas del suelo y métodos de determinación

Propiedad (Unidad de medida)	Método
Estabilidad estructural (Diámetro medio ponderado, mm)	Tamizado en húmedo, método Yoder, cálculo de diámetro medio ponderado. Cuatro repeticiones en un solo muestreo en cada parcela de medición.
Textura (Porcentaje de arcillas, limos y arenas)	Método de Bouyucos, definición de clase por triángulos textural. Cuatro repeticiones en un solo muestreo en cada parcela de medición.
Textura (Porcentaje de arenas muy gruesa, gruesa, media, fina y muy fina)	Separación de arenas por tamizado en húmedo. Una repetición en un solo muestreo en cada parcela de medición.
Capacidad de retención de humedad (Porcentaje de saturación, retención a 0,1, 0,3, 1, 3 y 15 bares, agua aprovechable)	Método de cámaras de succión. Cálculo de agua aprovechable. Cuatro repeticiones en un solo muestreo en cada parcela de medición.
Densidad real (g c ⁻³)	Método del picnómetro. Cuatro repeticiones en un solo muestreo en cada parcela de medición.
Densidad aparente (g c ⁻³)	Método de anillo de volumen conocido. Cuatro repeticiones en un solo muestreo en cada parcela de medición.
Porosidad total (%)	$[(\text{Densidad real} - \text{Densidad aparente}) / \text{Densidad real}] \times 100$. Cuatro repeticiones en un solo muestreo en cada parcela de medición.
Infiltración básica (mm h ⁻¹)	Método de campo. Anillos infiltrómetros. Una repetición en cada parcela de medición.
Humedad gravimétrica (%)	Determinación en laboratorio por peso de suelo húmedo y peso de suelo seco. Una muestra antes de cada medición.
Carbono orgánico (%)	Colorimétrica. Walkey y Black
pH (Unidades de pH)	Potenciométrico. Relación suelo-agua 1:2
Acidez intercambiable (meq 100g ⁻¹)	Volumétrica. Extracción con KCl 1M, Al+H, NTC 5263
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	Conductimétrica. Extracto de la pasta de saturación. NTC 5596
Cationes de cambio (Ca, Mg, K y Na, meq 100g ⁻¹)	Absorción atómica. Método de acetato de amonio 1N pH7

Figura 2-6: Equipo instalado en lote por entresaque después del corte (a), equipo instalado en lote por parejo (b), equipo instalado en lote con plantilla (c).

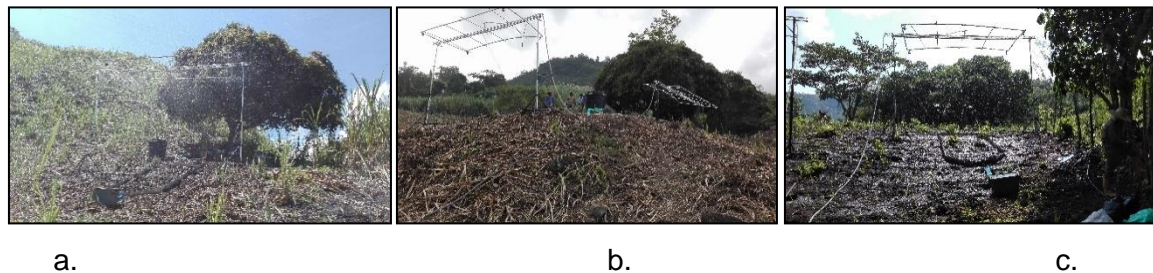
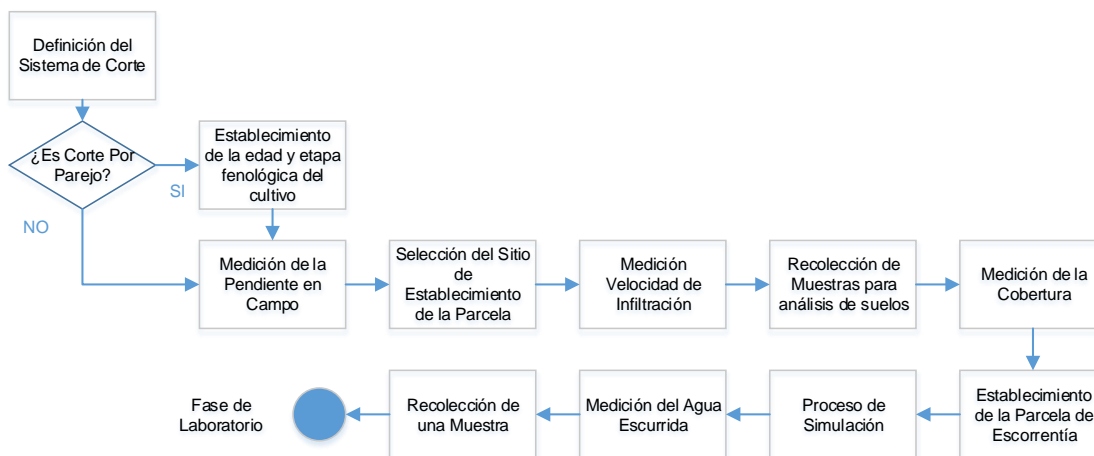


Figura 2-7: Metodología Fase de Campo



2.2.5 Procesamiento de muestras en laboratorio

Luego de la fase de campo, se tienen dos tipos de muestras, las primeras corresponden a las muestras de suelo tomadas en el lote, con las cuales se realiza la determinación de propiedades hidrofísicas y químicas asociadas al proceso de erosión. El segundo tipo de muestras corresponden a las alícuotas agua-suelo obtenidas del colector del agua de escorrentía, ubicado en la parte final de la parcela, y tomada en cada una de las mediciones realizadas en campo. Se realiza el procesamiento de las mismas en laboratorio pasándolas por papel filtro, con el fin de separar las partículas sólidas del suelo del agua de escorrentía (Figura 2-8), luego se seca la muestra en horno a 105° durante 24 horas, y se pesa el suelo seco correspondiente. En esta etapa se realiza una relación entre la cantidad de suelo

recogido en la muestra llevada a laboratorio, la cantidad de agua recogida en total en campo, y el área de la parcela de erosión.

Figura 2-8: Separación de muestras de suelo perdido por separación mediante papel filtro



2.2.6 Cálculos y análisis

En esta etapa se realiza la determinación de los distintos parámetros obtenidos en la fase de campo y de laboratorio como los parámetros de la ecuación Kostiakov, para representar el fenómeno de la velocidad de infiltración, el cálculo de la porosidad como una relación entre las densidades, el diámetro ponderado, de los datos de estabilidad estructural, el agua aprovechable de la diferencia entre la humedad a tensión de 0,1 bares y 15 bares, de la curva de retención de humedad. Con el fin de expresar la erosión en términos de peso por área se multiplicó el peso de suelo perdido, determinado en laboratorio, por la fracción de área, correspondiente a la parcela de escorrentía y se extrapoló al valor en kg ha^{-1} .

- Determinación de suelo perdido por cada medición

Para la determinación de suelo perdido (SP [g]) por medición, y la pérdida de suelo por hectárea (PS [kg ha^{-1}]) correspondiente a cada medición se presenta a continuación el procedimiento de cálculo:

$$SP = \frac{SS}{TM} * MC \quad (2.1)$$

$$PS = \frac{SP}{8,91 \cdot 1000} * 10000 \quad (2.2)$$

Dónde SP es el suelo perdido en cada medición expresado en g, SS es el peso de suelo seco en laboratorio expresado en g, TM es el tamaño de muestra de agua de escorrentía, procesada en laboratorio expresado en l, MC es la medida tomada en campo de agua de escorrentía, expresada en l, PS es la pérdida de suelo expresada en kg ha^{-1} (8,91 corresponde al área de la parcela de escorrentía en m^2 , 1000 es el factor para pasar de g a kg y 10000 para pasar m^2 a ha).

2.3 Caracterización inicial de suelos y rendimientos de cultivo.

Como se presentó en la Figura 2-4, las mediciones se distribuyeron en seis lotes, dentro de los cuales se tomaron cuatro parcelas, correspondientes a las cuatro repeticiones realizadas por cada observación. En la Tabla 2-2, se presenta la ubicación geográfica de las parcelas de medición. Se observa que se trabajaron en total 6 lotes:

- Lote 1, cultivo en corte por entresaque con pendiente fuerte.
- Lote 2, cultivo en corte por parejo con pendiente fuerte.
- Lote 3, cultivo en corte por parejo con pendiente suave.
- Lote 4, cultivo en corte por entresaque con pendiente suave.
- Lote 5, plantilla con pendiente fuerte.
- Lote 6, plantilla con pendiente suave.

En cada uno de los lotes se realizaron mediciones en cuatro repeticiones, correspondientes a las cuatro parcelas numeradas en la Tabla 2-2, además se realizaron medidas repetidas en el tiempo, trabajando sobre las mismas parcelas en un tiempo 0, después del corte, a los tres meses del corte, llamado en este documento como tiempo Intermedio, y a los 6 meses del corte, momento en el cuál el cultivo ya ha realizado el cierre de calles, el cual en este estudio se conoce como tiempo Antes del corte. La caracterización física de suelos se obtuvo a partir de cuatro repeticiones (muestras) por cada parcela, por su parte para la determinación de propiedades químicas se llevó a laboratorio una sola muestra,

correspondiente a la mezcla de distintas muestras de suelo dentro de la parcela. Los resultados de caracterización se presentan en la Tabla 2-3 y en la Tabla 2-4.

Tabla 2-2: Coordenadas geográficas de parcelas de medición de erosión.

Lote	Corte	Pendiente	Identificación	Parcela	Norte			Oeste			Altura msnm
					o	'	"	o	'	"	
1	Entresaque	Fuerte	EF1	1	5	6	50,53	74	30	39,52	932,91
1	Entresaque	Fuerte	EF2	2	5	6	50,1	74	30	39,32	925,61
1	Entresaque	Fuerte	EF3	3	5	6	50,72	74	30	39,61	910,76
1	Entresaque	Fuerte	EF4	4	5	6	50,78	74	30	39,62	962,37
1	Entresaque	Suave	ES1	1	5	6	51,12	74	30	39,33	1019,29
5	Plantilla	Fuerte	PPF1	1	5	6	22,34	74	30	33,85	1030,34
5	Plantilla	Fuerte	PPF2	2	5	6	21,6	74	30	36,06	980,56
5	Plantilla	Fuerte	PPF3	3	5	6	21,84	74	30	36,43	910,76
5	Plantilla	Fuerte	PPF4	4	5	6	21,18	74	30	35,78	973,53
6	Plantilla	Suave	PPS1	1	5	6	21,55	74	30	35,66	971,71
6	Plantilla	Suave	PPS2	2	5	6	20,31	74	30	35,15	1007,39
6	Plantilla	Suave	PPS3	3	5	6	21,67	74	30	35,51	927,419
6	Plantilla	Suave	PPS4	4	5	6	21,27	74	30	35,58	969,57
4	Entresaque	Suave	ES2	2	5	6	19,5	74	30	34,91	912,96
4	Entresaque	Suave	ES3	3	5	6	19,14	74	30	34,38	974,63
4	Entresaque	Suave	ES4	4	5	6	19,61	74	30	34,78	996,42
4	Entresaque	Suave	ES5	5	5	6	18,76	74	30	35,29	893,14
2	Parejo	Fuerte	PF1	1	5	6	41,53	74	30	44	947
2	Parejo	Fuerte	PF2	2	5	6	41,44	74	30	43,18	1013
2	Parejo	Fuerte	PF3	3	5	6	42,31	74	30	42,93	979
2	Parejo	Fuerte	PF4	4	5	6	41,52	74	30	43,42	1018
3	Parejo	Suave	PS1	1	5	6	40,69	74	30	43,89	1003
3	Parejo	Suave	PS2	2	5	6	41,3	74	30	43,76	1013
3	Parejo	Suave	PS3	3	5	6	41,36	74	30	44,11	1008
3	Parejo	Suave	PS4	4	5	6	41,72	74	30	43,66	1007

Se observa en la Tabla 2-3, cierta homogeneidad en la mayoría de propiedades químicas, al comparar los distintos lotes. El pH en promedio tiene valores de 7,5 en el lote por entresaque con pendiente fuerte, hasta 8 en el lote con plantilla y pendiente suave, lo cual muestra que en general los suelos son Alcalinos a muy Alcalinos. En cuanto a la

conductividad eléctrica, todos los valores se encuentran en el rango de suelos no salinos, propiedad importante al momento de identificar procesos de degradación antes de la medición de erosión; aun cuando los lotes por parejo se fertilizan una vez al año, mientras que el entresaque no tiene ninguna aplicación, no se observa diferencias importantes entre estos lotes, en cuánto a niveles de salinidad.

Tabla 2-3: Caracterización química de suelos de lotes para medición de erosión hídrica superficial.

Lote	Identificación	Parcela	pH	CE	MO	P	Ca	Mg	K	Na	CICE
				(ds/m)	(g/100 g)	(mg/kg)	(cmol/kg)				
1	EF1	1	7,65	0,37	6,69	12,43	27,56	1,67	0,19	0,10	29,52
1	EF2	2	6,90	0,43	5,09	51,79	21,81	1,44	0,29	0,11	23,65
1	EF3	3	7,88	0,43	3,86	52,85	27,69	0,95	0,09	0,10	28,83
1	EF4	4	7,71	0,44	5,76	29,71	27,93	1,11	0,14	0,10	29,28
1	ES1	1	6,40	0,43	6,23	41,65	21,06	1,38	0,18	0,10	22,72
5	PPF1	1	7,78	0,26	6,96	10,44	34,28	1,63	0,71	0,10	36,72
5	PPF2	2	8,09	0,81	4,66	5,17	36,35	1,33	0,36	0,10	38,13
5	PPF3	3	7,82	0,83	4,94	13,60	32,15	1,36	0,47	0,10	34,08
5	PPF4	4	8,00	0,67	5,10	4,84	35,68	1,07	0,29	0,10	37,14
6	PPS1	1	8,11	0,92	5,14	4,08	37,53	1,24	0,28	0,10	39,16
6	PPS2	2	7,98	0,91	6,07	4,92	38,20	1,67	0,55	0,10	40,52
6	PPS3	3	7,96	1,16	5,05	4,24	39,25	1,27	0,30	0,10	40,94
6	PPS4	4	7,95	0,89	6,40	5,35	39,38	1,73	0,66	0,10	41,87
4	ES2	2	7,96	0,76	8,59	5,17	45,19	1,64	0,30	0,11	47,25
4	ES3	3	8,00	0,76	8,90	4,51	46,38	1,20	0,35	0,23	48,16
4	ES4	4	7,83	0,68	9,20	5,16	45,64	1,25	0,21	0,10	47,20
4	ES5	5	7,87	0,68	8,56	5,57	42,39	1,54	0,26	0,10	44,30
2	PF1	1	7,91	0,75	7,16	9,17	45,95	1,44	0,20	0,14	47,73
2	PF2	2	7,82	0,77	6,59	29,64	50,15	2,20	0,31	0,15	52,80
2	PF3	3	7,87	1,01	8,41	14,41	54,74	1,91	0,29	0,15	57,10
2	PF4	4	7,92	0,77	6,14	26,35	47,62	1,93	0,23	0,13	49,92
3	PS1	1	8,01	0,72	5,43	13,16	46,86	1,58	0,22	0,12	48,79
3	PS2	2	7,83	0,83	8,14	16,52	50,94	1,89	0,21	0,14	53,18
3	PS3	3	7,89	0,80	5,39	13,00	50,20	2,00	0,21	0,15	52,56
3	PS4	4	7,84	0,73	7,43	12,49	54,40	2,20	0,24	0,17	57,01

CE: Conductividad eléctrica – MO: Materia orgánica – CICE: Capacidad de intercambio catiónico efectiva

Tabla 2-4: Caracterización física de suelos de lotes para medición de erosión hídrica superficial.

Lote	Identificación	Parcela	DMP (mm)	AA	PT	IB (cm h ⁻¹)	A	L	Ar
				(%)	(%)		(%)	(%)	
1	EF1	1	2,71	7,72	55,43	3,04	56,98	23,91	19,11
1	EF2	2	2,68	7,31	52,57	0,26	52,34	22,37	25,30
1	EF3	3	2,23	8,15	49,98	17,52	43,68	22,01	34,31
1	EF4	4	1,79	8,86	51,74	4,88	43,97	23,48	32,55
1	ES1	1	2,78	9,10	56,84	58,31	53,55	19,55	26,91
5	PPF1	1	0,99	6,39	49,94	8,45	25,24	44,46	30,30
5	PPF2	2	1,52	5,83	44,42	0,84	28,64	44,70	26,66
5	PPF3	3	0,89	8,37	51,75	2,40	28,60	44,66	26,73
5	PPF4	4	1,05	9,60	53,37	10,83	22,89	45,41	31,70
6	PPS1	1	1,47	6,36	42,50	0,04	25,54	47,17	27,30
6	PPS2	2	1,25	5,77	44,65	0,02	31,70	45,23	23,08
6	PPS3	3	1,62	6,93	43,67	0,05	27,55	43,82	27,88
6	PPS4	4	1,65	7,39	49,50	0,06	32,82	39,78	27,40
4	ES2	2	2,46	10,33	59,15	9,81	30,56	38,60	30,84
4	ES3	3	2,81	10,88	58,96	11,84	33,22	42,83	23,95
4	ES4	4	3,45	11,74	56,72	67,89	30,25	44,55	25,20
4	ES5	5	3,26	13,29	58,83	19,00	30,29	39,93	29,79
2	PF1	1	3,37	9,44	53,92	16,70	48,18	19,06	32,75
2	PF2	2	4,29	11,18	55,47	22,69	56,68	20,06	23,25
2	PF3	3	3,17	11,42	59,68	9,75	42,68	18,56	38,75
2	PF4	4	3,80	8,84	54,07	20,90	55,18	17,56	27,25
3	PS1	1	3,34	6,34	47,55	6,07	49,18	17,06	33,75
3	PS2	2	3,47	9,31	59,49	35,46	47,18	21,56	31,25
3	PS3	3	3,78	8,14	55,82	13,18	47,68	19,56	32,75
3	PS4	4	3,69	8,42	53,96	22,99	48,68	19,56	31,75

DMP: Diámetro medio ponderado – AA: Agua aprovechable – PT: Porosidad total – IB: Infiltración básica – A: Contenido de arcilla – L: Contenido de limo – Ar: Contenido de arena

El contenido de materia orgánica en general es alto en las mediciones, y ligeramente mayor en entresaque con pendiente suave y en parejo en ambas pendientes. El contenido de P es medio en entresaque con pendiente fuerte, y bajo en todos los demás, con contenidos un poco mayores en los lotes con corte por parejo. En cuanto al contenido de cationes de

intercambio, se observa que todas las mediciones presentan altos contenidos de Ca, bajo contenido de Mg, a excepción de los lotes por parejo, donde el contenido de Mg es medio, contenido medio de K, a excepción del lote por entresaque con pendiente fuerte, donde el contenido de K es bajo, y se observa una mayor variabilidad del contenido de Na, con contenidos bajos en los lotes por plantilla y el lote por entresaque con pendiente fuerte, y contenidos normales en los demás. Por último, se observan valores altos de CICE en todas las observaciones, interpretación asociada a los altos contenidos de Ca (El valor presente en la Tabla 2-3, corresponde al obtenido por suma de cationes).

Por su parte, las propiedades físicas, presentadas en la Tabla 2-4 presentan cierta variabilidad especialmente aquellas propiedades que se pueden alterar con usos y prácticas de manejo distintas en el suelo, como el diámetro medio ponderado, el agua aprovechable, la porosidad total y la infiltración básica. El diámetro medio ponderado (DMP), es un indicador de la estabilidad estructural, variable importante en el proceso de erosión, al relacionarse con la capacidad de los agregados de romperse ante fuerzas hídricas externas. Se observó un comportamiento distinto del DMP con relación a los sistemas de manejo presentes en la finca. Se tienen valores que indicaban agregados ligeramente estables, en los lotes de plantilla, moderadamente estables en lotes por entresaque y estables en lotes por parejo.

El agua aprovechable (AA) es el valor determinado por la diferencia entre el contenido de humedad de capacidad de campo y el de punto de marchitez permanente, obtenidos por la curva de retención de humedad, por el método de cámaras de succión. Este valor está relacionado con la textura del suelo, con la porosidad y por lo tanto con el nivel de degradación del mismo. En general un valor mayor se considera mejor en términos de rendimientos para cultivos y en el caso del fenómeno de erosión, se asocia con un mejor movimiento de agua en el suelo, y con una mayor capacidad de retención del mismo, reduciendo los niveles de escorrentía superficial. Por lo tanto, es importante tener en cuenta que se tienen valores menores en lotes por plantilla, medios en lotes por entresaque y mayores en lotes por parejo.

Otra variable importante, para la determinación previa de procesos de degradación es la porosidad total (PT), la cual se obtiene de la relación entre la densidad real y la densidad

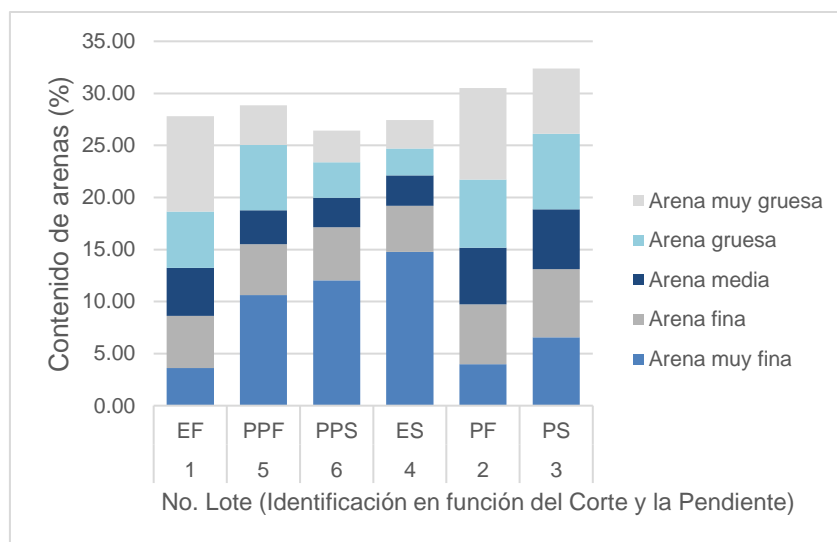
aparente del suelo. La primera es propia de la textura del suelo, mientras que la segunda puede variar según prácticas de manejo, contenidos de materia orgánica y niveles de compactación. Se observó en los lotes niveles bajos de porosidad total en lotes por plantilla, satisfactorios en entresaque con pendiente fuerte y parejo con pendiente suave y excelentes en parejo con pendiente fuerte y entresaque con pendiente suave. Se considera que una PT mayor o igual al 70% es excesiva, es buena cuando varía entre 55 y 60%; satisfactoria cuando varía entre 50 y 55%; y no satisfactoria, cuando es menor del 50%; en general el valor de PT puede variar entre 30 a 70% (Vásquez *et al.*, 2017). En promedio el lote por entresaque en pendiente fuerte tiene una PT satisfactoria (53,31%), al igual que el lote por parejo en pendiente suave (54,2%); el lote por entresaque en pendiente suave tiene una PT buena (58,41%), al igual que el lote por parejo en pendiente fuerte (55,78%); finalmente los lotes por plantilla presentan una PT no satisfactoria (47,47%).

Se observa en estas tres variables (DMP, AA y PT) que los niveles más bajos se encontraron en los lotes de plantilla, al ser lotes que se encontraban en descanso, luego al ser preparados para la siembra de forma manual, se dejan expuestos sin ningún tipo de cobertura, y en este se realizó un trabajo de labranza de forma manual e insuficiente previa al establecimiento del cultivo, indicando con niveles bajos de estas propiedades físicas un nivel de degradación con respecto a los lotes con cultivos de caña ya establecidos. Por su parte, se presentaron mejores características de estas variables en lotes por parejo, que en lotes por entresaque, lo que se podría asociar con niveles mayores de cobertura vegetal en lotes por parejo, y un mejor manejo de prácticas de cultivo.

Por otra parte, la infiltración básica (IB), fue la propiedad que presentó mayor variabilidad, sin embargo, se observa una tendencia similar en lotes por parejo y entresaque, con valores promedio de 20 cm h⁻¹, mientras que, en los lotes por plantilla, se tienen en promedio valores mucho más bajos (2,8 cm h⁻¹). Finalmente, se determinó una variable altamente asociada con el fenómeno de erosión e inherente a las características propias del suelo, la clase textural. Se presentaron en general altos contenidos de arcilla, con suelos arcillosos en los lotes por parejo y entresaque con pendiente fuerte, franco arcilloso en los lotes con plantilla en pendiente suave y entresaque en pendiente suave, y francos en lotes con plantilla en pendiente fuerte. La separación de arenas se muestra en la Figura

2-9, factor importante en pérdida de suelos, al considerar que entre las partículas más susceptibles a ser arrastradas por el agua de escorrentía se encuentran los limos y las arenas finas y muy finas, incluso la mayoría de modelos de predicción de pérdida de suelos, incluyen las arenas finas y muy finas entre sus factores de erodabilidad. Se observa que en general el contenido de arenas es similar en todos los lotes con contenidos del 27 al 32%, los contenidos más altos de arenas finas y muy finas se presentan en los lotes con plantilla, y en el lote por entresaque con pendiente suave, alcanzando contenidos de hasta el 17%.

Figura 2-9: Separación de arenas.



La caracterización de suelos se completó con la identificación de la taxonomía del mismo, describiendo el perfil característico del suelo observado en la finca. El perfil se presenta en la Figura 2-10 y la descripción de los horizontes en la Tabla 2-5, de donde se estableció que el suelo correspondía a un vertisol, Typic Haplusterts isohipertérmico muy fino, debido a la alta presencia de arcillas expandibles, la presencia de grietas, superficies de deslizamiento, estructuras en forma de cuña, con limitantes de uso debido a fuertes pendientes, y baja retención de humedad, con pedregosidad esporádica y buen drenaje natural.

Una característica importante a tener en cuenta en los vertisoles es su contenido de arcilla que varía de 30 a 80%, la predominancia de este tamaño se asocia con una tendencia a estar fuertemente agregados, por lo cual se erosionan en gran medida como material agregado (Freebairn, *et al.*, 1996). La erosión del suelo es una de las mayores limitaciones para la producción de vertisoles, debido a sus bajas tasas de infiltración cuando están húmedos y a su alta erodabilidad relativa (Freebairn, *et al.*, 1996). La definición de propiedades químicas y algunas propiedades físicas de los horizontes identificados se presenta en la Tabla 2-6.

Figura 2-10: Perfil característico del suelo de la finca.



2.3.1 Rendimientos de cultivos

Otro factor que se tuvo en cuenta para la caracterización inicial de los lotes de trabajo fue el rendimiento de cultivo, el cual presentó una media para lotes por parejo de 80,27 t ha⁻¹, correspondientes a un corte al año, y en el caso de entresaque de 45,37 t ha⁻¹, para un corte de cerca del 80%, y teniendo en cuenta que se hacen dos al año, se tendría un valor promedio de 56,71 t ha⁻¹ al año. Se observa además que los valores de peso de hojarasca

son mayores en corte por parejo que en corte por entresaque, lo que se asociaría con el comportamiento de algunas variables físicas explicadas anteriormente. Esta evaluación se tiene en cuenta como una covariable de caracterización del lote, por lo cual se realizó en el momento justo antes del corte. Los resultados de las mediciones de rendimiento realizadas en campo se presentan en la Tabla 2-7.

Tabla 2-5: Descripción de horizontes perfil característico de suelo de la finca.

Profundidad Identificación de horizonte	Descripción
0 – 40 cm A _{pss}	Color en húmedo 10YR3/2 (Color pardo grisáceo muy oscuro) y 10YR4/2 (Color pardo grisáceo oscuro) en un 10%; textura Arcillosa; estructura en bloques angulares, fina y media, fuerte; consistencia en seco dura, en húmedo firme, en mojado pegajosa y muy plástica; se presentan concentraciones de carbonatos de calcio; frecuentes, irregulares, medias, de consistencia duras y distribución Irregular; frecuentes poros, finos, tubulares, continuos; Muchas raíces, muy finas, finas y medias, vivas de distribución normal; Poca a frecuente actividad de macroorganismos; fuerte reacción al HCl en concentraciones de CaCO ₃ , Fuerte reacción al NaF, fuerte reacción al H ₂ O ₂ ; límite difuso, Irregular; pH 8,2.
40 – 85 cm AB _{ssk}	Color en húmedo 10YR3/2 (Color pardo grisáceo muy oscuro) y 10YR3/1 (Color gris muy oscuro) en un 40%; textura arcillosa; estructura en bloques angulares, media y gruesa, moderada a fuerte; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa y muy plástica; se presentan frecuentes, concentraciones de carbonatos de calcio; irregulares, gruesas, duras, de distribución Irregular; recubrimientos de arcilla; frecuentes poros, finos y pocos medianos, tubulares, continuos; muchas raíces, finas, pocas gruesas, vivas y muertas de distribución normal; poca actividad de macroorganismos; fuerte reacción al HCl en concentraciones de CaCO ₃ , ligera reacción al H ₂ O ₂ ; límite difuso, irregular; pH 8,42.
85 – 120 cm B _{wss}	Color en húmedo 10YR3/1 (Color gris muy oscuro) y 10YR3/3 (Color pardo oscuro) en un 15%; textura arcillosa con fragmentos de roca tipo gravilla, con forma angular, alteración media en (15 %); estructura en bloques angulares, media y gruesa, débil a moderada; consistencia en húmedo firme, en mojado muy pegajosa y muy plástica; se presentan pocas concentraciones de carbonatos, irregulares, duras, distribución irregular; frecuentes poros, finos y pocos medianos, tubulares, continuos; pocas raíces, finas y gruesas, vivas y muertas de distribución normal; poca actividad de macroorganismos; no hay reacción al HCl, Ligera reacción al H ₂ O ₂ ; límite difuso, irregular; pH 8.
OBSERVACIONES:	
Grietas de 2 y 1 cm de ancho, a profundidad de 60 a 67 cm. Agregados en forma de cuña.	

Tabla 2-6: Propiedades físicas y químicas perfil característico.

PROPIEDADES QUÍMICAS			
Determinación analítica (Unidad)	0 – 40 cm	40 – 85 cm	85 – X cm
	A_{pss}	AB_{ssk}	B_{wss}
pH (Unidades de pH)	8,20	8,42	8,02
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	0,50	0,44	0,27
Materia orgánica (g 100g ⁻¹)	2,48	1,73	1,11
Fósforo disponible Bray II (mg kg ⁻¹)	29,78	13,76	111,21
Acidez intercambiable (Al+H) (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	0,00	0,00	0,00
Aluminio intercambiable (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	0,00	0,00	0,00
Calcio intercambiable (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	33,92	36,97	27,46
Magnesio intercambiable (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	0,48	0,49	0,34
Potasio intercambiable (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	0,10	0,08	0,14
Sodio intercambiable (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	<0,10	<0,10	<0,10
Capacidad de intercambio catiónico (CICE) (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	34,61	37,64	28,04
PROPIEDADES FÍSICAS			
Porcentaje de arcilla (Bouyoucos)	59,42	63,69	67,96
Porcentaje de limo (Bouyoucos)	20,76	20,80	20,83
Porcentaje de arena (Bouyoucos)	19,81	15,52	11,20
Clase textural	Arcilloso	Arcilloso	Arcilloso
Densidad aparente (Método del terrón parafinado) (g cm ⁻³)	1.54	1.53	
Coefficiente de extensión lineal (Método del rodillo)	0.1038	0.1013	0.1014

2.4 Mediciones de erosión hídrica superficial

Luego de la caracterización de lotes, en cuanto a propiedades físicas, químicas y datos asociados al cultivo, se realizaron las mediciones de erosión hídrica superficial. La bitácora con todos los datos de medición en campo, se encuentran en el Anexo B, donde se presentan los resultados de suelo perdido de las 168 mediciones realizadas, expresados en gramos, correspondientes a las mediciones de 15 minutos de duración en una parcela de 8,92 m². En la Figura 2-11 y en la Figura 2-12, se presenta un resumen del comportamiento de los componentes del balance hídrico en las distintas combinaciones de corte, pendiente y momento. Al tener una precipitación de 15 minutos, se asume que la evapotranspiración es casi nula en este tiempo de simulación, por lo tanto, se tienen en

cuenta la precipitación, la escorrentía, y de la diferencia de estos dos valores en las mediciones, se obtiene la infiltración.

Tabla 2-7: Datos de rendimiento en lotes de entresaque y parejo.

Lote	Identificación	Bloque	TC (min)	PTM (kg)	PH (kg)	Pco (kg)	NC	NPP	PC (%)	R (Ton/Ha)
1	EF	1	41	140.00	35.00	30.20	165	26	84.24	56.00
		2	31	94.20	26.00	21.20	116	44	62.07	37.68
		3	38	122.50	31.00	22.80	119	14	88.24	49.00
		Promedios	37	118.90	30.67	24.73	133	28	79.00	47.56
2	PF	1	67	306.80	52.00	53.00	155	0	100.00	122.72
		2	29	170.00		16.40	62	0	100.00	68.00
		3	58	203.00		20.10	74	0	100.00	81.20
		Promedios	51	226.60	52.00	29.83	97	0	100.00	90.64
3	PS	1	30	199.60	43.60	35.20	172	0	100.00	79.84
		2	15	137.60	34.00	26.00	106	0	100.00	55.04
		3	25	187.00	39.60	30.40	192	0	100.00	74.80
		Promedios	28	175	39	31	157	0	100	69.89
4	ES	1	27	114	32.5	48	121	27	77.69	45.60
		2	27	113.88	28	61.8	124	27	78.23	45.55
		3	15	95.9	21.5	42	121	20	83.47	38.36
		Promedios	23	107.93	27.33	50.60	122	25	79.78	43.17

TC: Tiempo de corte - PTM: Peso tallos molibles - PH: Peso hojarasca - Pco: Peso cogollos - NC: Número de cogollos - NPP: Número plantas en pie - PC: Porcentaje de corte - R: Rendimiento

En la Figura 2-11, se comparan las tres boquillas, en los dos rangos de pendiente y en los diferentes cortes, en el momento después del corte, datos que pueden ser comparados con las mediciones realizadas en el lote por plantilla, el cual se incluye también en esta Figura. Se observa que los valores de precipitación son iguales en todas las comparaciones, correspondientes al caudal entregado por las boquillas, evaluado en condiciones de laboratorio y algunas verificaciones hechas en campo previamente. Además, se observa que la escorrentía en el corte por entresaque en ambos rangos de pendiente, es claramente menor que los valores presentados en las mediciones de corte por parejo y en plantilla, donde se tienen comportamientos similares en cuanto al nivel de

escorrentía superficial. Por otra parte, no se observa un comportamiento distinto de la escorrentía asociado con la pendiente, a excepción del corte por parejo, en donde fue menor en pendiente fuerte que en pendiente suave, dicho comportamiento se podría asociar con los valores de porosidad total que fueron menores en los lotes de corte por parejo con pendiente suave, que en los lotes por parejo con pendiente fuerte.

Figura 2-11: Componentes de balance hídrico en cada boquilla utilizada. Momento después del corte y plantilla

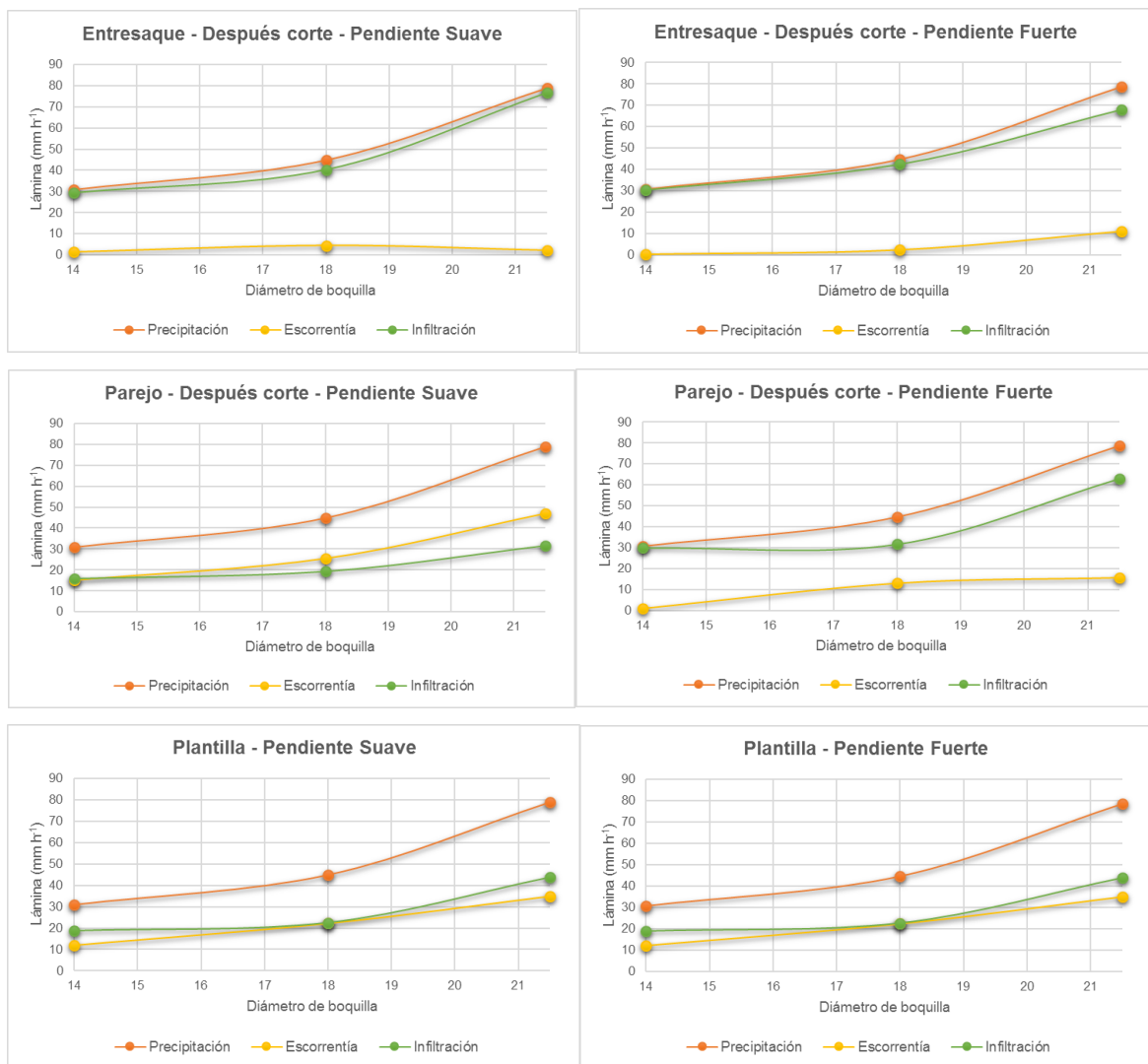
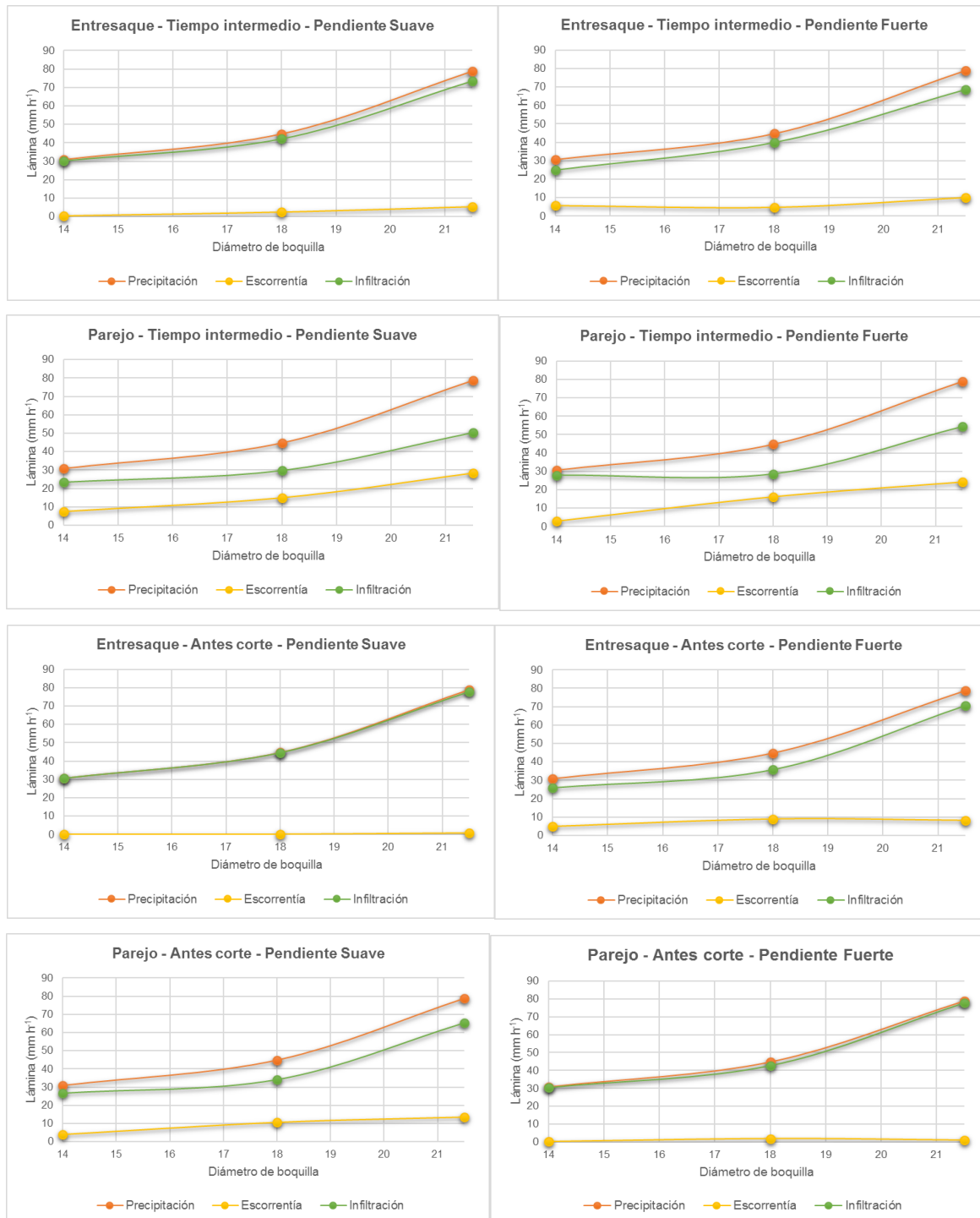


Figura 2-12: Componentes de balance hídrico en cada boquilla utilizada. Momento intermedio y antes del corte.



Las demás mediciones en corte por entresaque y parejo, en ambos rangos de pendiente, con las tres boquillas y en los momentos intermedio y antes del corte, se presentan en la Figura 2-12. Se observa que en el corte por entresaque, no se diferencian los valores de escorrentía a través de los distintos momentos de observación, a excepción con las mediciones antes del corte, en donde la escorrentía disminuyó claramente. Por su parte el corte por parejo si presenta una clara disminución de la tasa de escorrentía con relación al tiempo en el cual se hace la medición (a los tres y seis meses). Nuevamente no se observan tendencias con relación al rango de pendiente.

En cuanto a la pérdida de suelo, se expresaron los resultados en kg ha^{-1} , extrapolando los resultados obtenidos en el área de las parcelas de medición. En la Figura 2-13, se presentan los resultados expresados en kg ha^{-1} , buscando comparar los sistemas de corte, en función con el momento de la medición, bien sea después del corte, en tiempo intermedio o antes del corte, además de comparar los dos rangos de pendiente seleccionados. Aunque no se observan claramente las tendencias, en el caso de la pendiente suave se nota visiblemente que las pérdidas de suelo son mayores en parejo que en entresaque, además se resalta en el caso de entresaque que las pérdidas de suelo van disminuyendo a medida que el cultivo se encuentra en un mayor estado de desarrollo. Esta relación de pérdida de suelo con el momento de la medición, también se observa visiblemente en el caso del corte por parejo y pendiente fuerte, por su parte, no se observa esta tendencia en el caso del entresaque y pendiente fuerte, además las pérdidas son mayores en este corte en el momento intermedio y antes del corte, que en el corte por parejo.

La tendencia más clara es el efecto de la intensidad de la precipitación, debido a la diferencia en el tamaño de la boquilla, sobre la pérdida de suelo. Esta comparación se puede observar en la Figura 2-14, en donde se resalta esta tendencia con relación al corte, el momento de medición y la pendiente, los datos de pérdida de suelo se expresan en este caso en kg ha^{-1} . En todos los casos es notable como la intensidad de precipitación tiene un claro efecto en la pérdida de suelo, siendo mayor la pérdida de suelo al aumentar la intensidad de precipitación. Se observa también en la Figura 2-14, que la pérdida de suelos en pendiente fuerte es ligeramente mayor que en pendiente suave, sin embargo, esta

tendencia es más evidente en las mediciones realizadas después del corte, que en los otros dos estados.

Figura 2-13: Comparación de resultados de pérdida de suelo expresados en kg ha^{-1} , en tiempos asociados al corte.

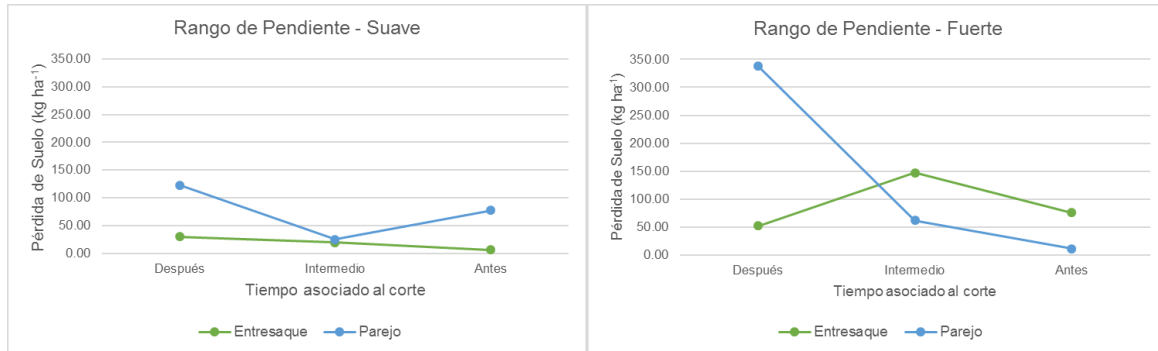
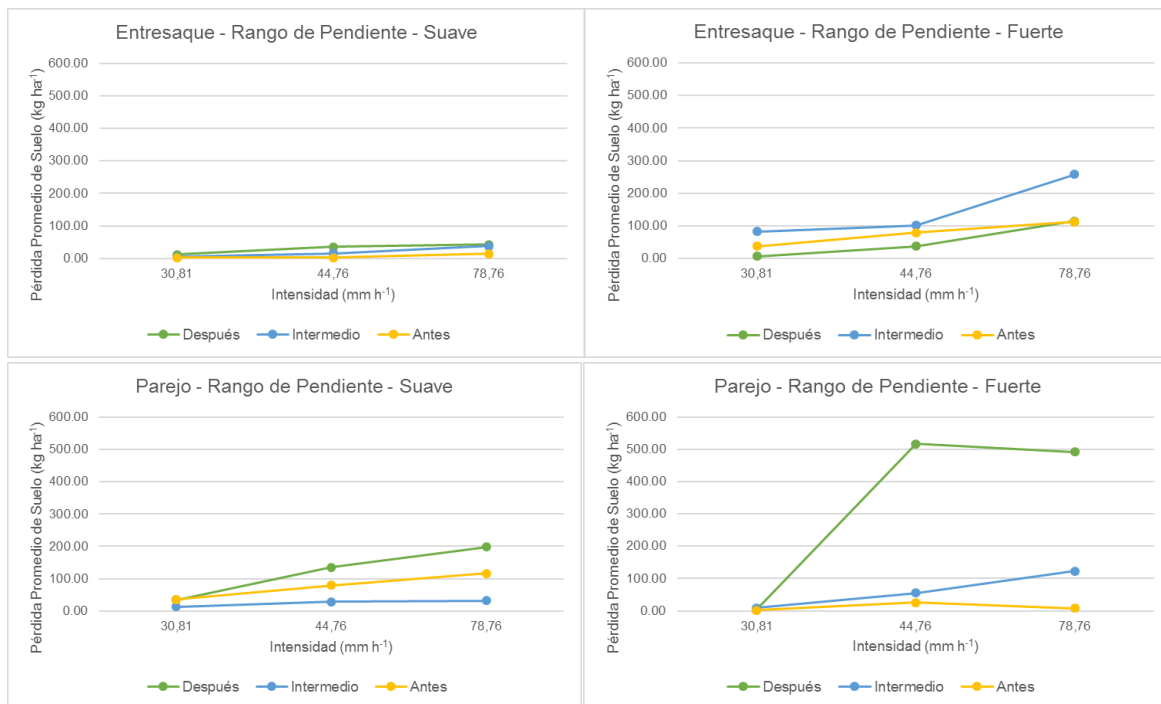


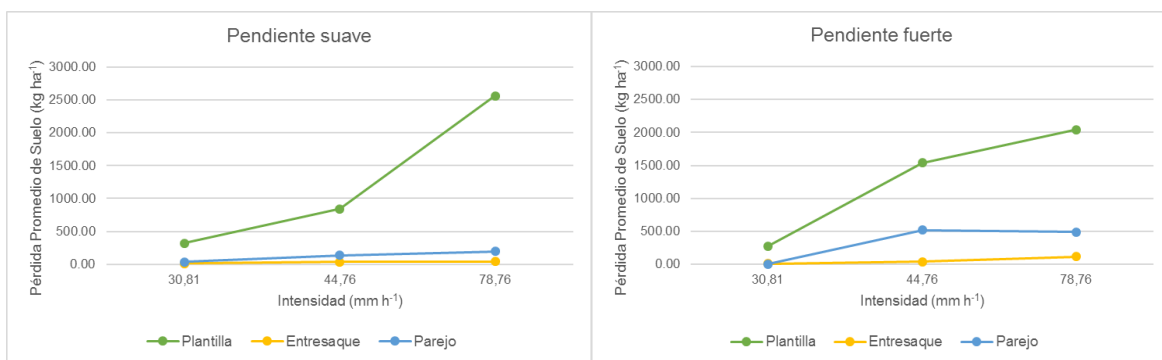
Figura 2-14: Comparación de resultados de pérdida de suelo expresados en kg ha^{-1} , con los tres valores de intensidad de precipitación.



En el caso de entresaque en pendiente suave y parejo de pendiente fuerte, se observa claramente una relación inversa entre las pérdidas de suelo y el momento de la medición, notando que las pérdidas van disminuyendo a medida que el cultivo tiene un mayor grado de desarrollo. Se resalta también en la Figura 2-14, que en general se presentan mayores pérdidas de suelo en corte por parejo, que en entresaque.

Finalmente se presenta en la Figura 2-15, una comparación de la pérdida de suelo en cortes por entresaque y parejo, después del corte y los valores registrados en plantilla. Se observa que no hay una tendencia clara con relación a la pendiente, comportamiento que se puede deber al nivel de cobertura y hojarasca que constantemente está en los lotes, indicando que la protección brindada a los mismos podría reducir un poco la afectación esperada a causa de la pendiente. Es de resaltar el aumento en pérdidas de suelo en el caso de plantilla, dónde no se tiene ninguna cobertura que ayude a reducir el impacto de la precipitación y por ende disminuir el riesgo de erosión, en especial en las dos boquillas de mayor tamaño. Además, se observa nuevamente que las pérdidas de suelo son mayores en el corte por parejo que en entresaque, sin embargo, en ambos casos son notablemente menores que las mediciones realizadas con suelo desnudo o plantilla.

Figura 2-15: Comparación de resultados de pérdida de suelo, expresados en kg ha^{-1} . Plantilla, Entresaque después del corte y Parejo después del corte.



3. Definición de un modelo local, con base en un modelo de pérdida de suelo previamente validado.

La producción de erosión a nivel local y su estimación a través de un periodo de tiempo, se puede calcular por medio de modelos establecidos previamente como la ecuación modificada de pérdida universal de suelo MUSLE (Williams, 1975) la cual utiliza la cantidad de pérdidas de suelo para simular la producción de erosión y sedimento asociado, y la ecuación universal de pérdida de suelo USLE, que utiliza la lluvia como un indicador de energía erosiva (Freebairn, *et al.*, 1996). Otro modelo que implementa ajustes a la ecuación universal de pérdidas de suelo USLE, es el EPIC, desarrollado para simular el impacto de la erosión en la producción de cosechas y el CREAMS, basado en procesos (Knisel, 1980), derivado de la USLE, el cual requiere información sobre los tamaños de partículas disponibles para el arrastre y la deposición del material, esta predicción de tamaño de sedimentos tiene un número de dificultades inherentes que llegan a ser más críticas cuando se trabajan con vertisoles, y aún no existe un método para la estimación del tamaño de sedimento que parezca relevante para todos los tipos de suelo (Freebairn, *et al.*, 1996).

La USLE fue un modelo desarrollado para predecir el movimiento promedio anual de suelos desde una pendiente específica, bajo condiciones de uso y manejo específicos, orientar la selección de prácticas de conservación para localidades específicas, estimar la reducción de pérdida de suelos que se puede lograr con cambios de manejo efectuados por el agricultor y determinar el largo máximo de pendiente tolerable para un sistema de cultivo determinado (Vargas, 2010). El modelo empírico USLE fue presentado en 1960 por Wischmeier y Smith sobre una base de datos de 10000 combinaciones de parcelas de escurrimiento-año, bajo lluvia natural (García *et al.*, 2017), además de ser el más difundido universalmente (Gevozdovich *et al.*, 2017), permite la aplicación de adaptaciones metodológicas para el cálculo de sus factores, aun cuando no se cuenta con todos los

datos requeridos (Moreno *et al.*, 2017). En general los modelos expresan la pérdida de suelo en términos de factores asociados a la lluvia, al volumen y flujo máximo de escorrentía, a las propiedades hidrofísicas del suelo, a la cobertura, manejo, y a la topografía (Williams, 1975).

Los modelos para la estimación de la escorrentía superficial se basan en la predicción de la precipitación diaria, la predicción de valores iniciales, como el almacenamiento de agua en la superficie del suelo, la velocidad de infiltración antes de la escorrentía, y parámetros de retención de humedad, asociados a cambios en el suelo, uso de la tierra, prácticas de manejo, inclinación del terreno y cambios temporales en el contenido de humedad del suelo (Neitsch *et al.*, 2005). La existencia de diversos métodos y modelos desarrollados para la predicción, evaluación y medición de la erosión hídrica superficial permite entender el comportamiento de dicho fenómeno, así como establecer recomendaciones de manejo y control para reducir su efecto negativo sobre el desarrollo de cultivos. Sin embargo, las condiciones de distintas regiones, con diversas prácticas de manejo de cultivos, hace necesario ajustar las metodologías y modelos existentes para que se aproximen a las condiciones reales sobre las cuales se quiere trabajar.

3.1 Aspectos metodológicos

Al tener información climática de la región de estudio, información edáfica, caracterización de los suelos, y los valores de suelo perdido por unidad de área, se puede realizar la adaptación a un modelo, en el que se busque predecir las tasas de suelo perdido, con relación al tipo de sistema de corte, la edad fenológica del cultivo, la pendiente del terreno, y la intensidad de la precipitación. La última fase del proyecto de investigación se relaciona con la definición de un modelo que permita representar el fenómeno de erosión hídrica superficial en la zona de estudio, para las condiciones de cultivo evaluadas. Con este fin se realizó una revisión de modelos validados y elaborados previamente que tienen en cuenta las distintas variables evaluadas, como las propiedades del suelo, las condiciones topográficas, el comportamiento de la precipitación, y variables asociadas a la cobertura, manejo o estado fenológico del cultivo. Para el caso de caña panelera se observa la necesidad de asociar este último parámetro a los sistemas de corte evaluados.

Se realizaron análisis estadísticos para entender la relación de los sistemas de corte, pendientes y las intensidades de los eventos simulados, sobre la pérdida de suelo, teniendo en cuenta que el diseño bajo el cual se llevó a cabo la selección de factores en campo, correspondió a un diseño en parcelas subdivididas, analizadas en medidas repetidas al incluir el factor momento (mediciones realizadas cada tres meses), además se incluyó un análisis de la pérdida de suelo en función de las covariables determinadas asociadas con propiedades físicas y químicas del suelo, y datos referentes al cultivo. El análisis de la interacción de factores con la pérdida de suelos se llevó a cabo por medio de un diseño de parcelas subdivididas, metodología utilizada, cuando los niveles de un factor, por su naturaleza, o por problemas de manejo del experimento, requiere el uso de unidades grandes, mientras que los niveles de otros factores si pueden asignarse a unidades más pequeñas (Amézquita & Muñoz, 1978). Los niveles del primer factor se asignan al azar a las parcelas grandes, los niveles del segundo factor se asignan al azar a las subparcelas de cada parcela grande y los del tercer factor se asignan al azar a las sub-subparcelas de cada subparcela. Cada parcela grande contiene tantas subparcelas como niveles del segundo factor existan; similarmente cada subparcela contiene tantas sub-subparcelas como niveles del tercer factor existan (Amézquita & Muñoz, 1978).

De acuerdo a los estudios consultados en mediciones de erosión, la base de los modelos de predicción, es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos, de la cual existen distintas adaptaciones a condiciones específicas y algunas modificaciones respecto a la forma en la que se determinan ciertos índices asociados, sin embargo se cumplen siempre las condiciones establecidas por esta ecuación, en la que se tiene en cuenta las fuerzas erosivas, asociadas a la precipitación, y la erodabilidad, en la que se incluyen las propiedades del suelo, las condiciones de pendiente, y un factor importante asociado al manejo, el cual es fundamental para el enfoque de este estudio, en el que se busca establecer las diferencias presentes entre los tipos de corte del cultivo de caña de azúcar para la producción de panela. Por esta razón, se seleccionó esta ecuación, como el modelo que permitía realizar estimaciones de erosión potencial asociada con los sistemas de corte en caña panelera, y a las condiciones climáticas y edáficas propias del lugar donde se llevaron a cabo las mediciones de erosión hídrica superficial. En este sentido, se realizó una regresión con los datos de pérdida de suelo para determinar el factor C, asociado el

manejo de cultivo en la USLE, con el fin de adaptar este modelo de predicción de pérdida de suelos a las condiciones específicas de interés en este estudio.

3.2 Análisis estadístico

Luego de observar algunas claras tendencias de la pérdida de suelos, en especial con factores de diseño como el corte, el momento de la medición y el tamaño de boquilla, se realizó un análisis estadístico, con el fin de evidenciar de una manera más clara las relaciones presentes entre factores y la pérdida de suelo. La selección del método de análisis se realizó de acuerdo con la forma en la que se llevó a cabo la selección de lotes en campo, ya que se inició con la identificación de cortes, es decir, aquellas áreas dentro de la finca en las que tradicionalmente se llevaban a cabo un manejo por parejo o entresaque.

De esta forma se identifica que este es un factor principal, no aleatorizable, por medio del cual se realizó la primera división de la finca para la posterior selección de lotes de medición. Luego se diferenciaron por otro factor que tampoco permitía aleatorización, la pendiente, de esta forma se identificaron cuatro lotes de las combinaciones de sistema de corte y pendiente. Dentro de estos se hizo posible la aleatorización de tamaño de boquilla. Esta interacción de factores permite un análisis en parcelas subdivididas, el cual es el diseño más aproximado a la forma en la que se identificaron los lotes de observación dentro de la finca. Por otra parte, para completar la interacción de factores, se tiene el momento de corte, el cuál correspondió a una medida repetida en el tiempo con tres meses de separación entre cada una de las medidas. Teniendo en cuenta la selección en el equipo de tres tamaños de boquilla distintos, el primero de 5,56 mm de apertura, el cual simula una intensidad de lluvia aproximada de 30,81 mm hora⁻¹, la segunda boquilla con una apertura de 7,14 mm que simula un valor de intensidad de lluvia aproximado de 44,76 mm hora⁻¹ y una tercera intensidad de precipitación de 78,76 mm hora⁻¹, simulada con una boquilla de apertura de 8,53 mm. Se denominarán de aquí en adelante las tres intensidades como I31, I45 e I79, de acuerdo con una aproximación de los valores de intensidad aplicados con el simulador.

3.2.1 Parcelas subdivididas, análisis independiente de momentos

- **Primer momento: Después del corte**

Una primera comparación estadística se realizó entre los factores corte, pendiente, e intensidad en el momento después del corte, con el fin de poder comparar los resultados de pérdida de suelo en ambos sistemas de corte y en el lote por plantilla. El análisis de varianza entre factores y su interacción, obtenido con el software R, se presenta a continuación.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Pendiente	1	128563	128563	0.331	0.56765	
Corte	2	16494886	8247443	21.218	1.7e-07	***
Intensidad	2	6089093	3044547	7.833	0.00105	**
Pendiente:Corte	2	103940	51970	0.134	0.87514	
Pendiente:Intensidad	2	510255	255127	0.656	0.52290	
Corte:Intensidad	4	7148552	1787138	4.598	0.00292	**
Pendiente:Corte:Intensidad	4	847354	211839	0.545	0.70340	
Residuals	53	20600852	388695			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Se observa en el análisis de varianza, que en efecto los factores que tienen mayor incidencia en los resultados de pérdida de suelo son en orden de importancia estadística, el corte, la boquilla y la interacción corte:boquilla, al igual que en el análisis exploratorio inicial, no se observa un efecto claro de la pendiente sobre la pérdida de suelo. La verificación de estos análisis se realizó con la comparación de medias, con prueba Tukey obtenido en R, como se muestra a continuación.

```

$Pendiente
      diff      lwr      upr      p adj
Fuerte-Suave 84.51278 -223.5997 392.6253 0.5846402

Pérdida de Suelo Promedio P. Fuerte (kg/ha) 559.13
Pérdida de Suelo Promedio P. Suave (kg/ha) 464.28

$Corte
      diff      lwr      upr      p adj
Parejo-Entresaque 168.3167 -285.2915 621.9249 0.6462363
Plantilla-Entresaque 1088.9879 635.3797 1542.5961 0.0000011
Plantilla-Parejo 920.6712 467.0630 1374.2795 0.0000277

Pérdida de Suelo Promedio Entresaque (kg/ha) 41.33
    
```

Pérdida de Suelo Promedio Parejo (kg/ha) 230.24
Pérdida de Suelo Promedio Plantilla (kg/ha) 1263.54

§Intensidad

	diff	lwr	upr	p adj
I45-I31	364.1600	-89.4482	817.7682	0.1387933
I79-I31	712.2771	258.6689	1165.8853	0.0011145

Pérdida de Suelo Promedio I31 (kg/ha) 109.00
Pérdida de Suelo Promedio I45 (kg/ha) 517.71
Pérdida de Suelo Promedio I79 (kg/ha) 908.41

De acuerdo con la interpretación de la prueba Tukey, se diferencian claramente las medias, cuando el p valor es menor que 0,05, se observa que se cumple esta interpretación en el caso del sistema de corte, siendo nuevamente el factor que presenta mayor importancia estadística para explicar la variabilidad de datos de pérdida de suelos, en este primer caso de datos medidos después del corte y en plantilla, se observa que la pérdida de suelo promedio es mayor en el caso del corte por parejo, con respecto al corte por entresaque. Sin embargo, aunque en este caso se establecieron diferencias entre cada uno de los sistemas de corte y el estado inicial de plantilla, no se resaltan diferencias estadísticas significativas entre ambos sistemas de corte específicamente. Se observa también que la diferencia entre medias es notable al comparar las intensidades I31 e I79, correspondiente al tamaño mínimo y máximo de diámetro de apertura, asociado con la menor y la máxima intensidad simuladas. Por otra parte se resalta la relevancia de la interacción intensidad y corte, como se presenta en la Tabla 3-1, donde se muestran los valores medios de pérdida de suelos en las interacciones corte-intensidad, se resalta la diferencia en el caso de plantilla con las dos intensidades de mayor valor, con respecto a los demás valores medios.

Tabla 3-1: Valores medios de la interacción de factores corte-intensidad. Momento después del corte, incluyendo plantilla.

Valor medio pérdida de suelo (kg ha ⁻¹)		I (Intensidad)		
		I31	I45	I79
C (Corte)	P (Parejo)	19,31	326,11	345,30
	E (Entresaque)	9,51	36,25	78,24
	PP (Plantilla)	298,17	1190,75	2301,70

El análisis para las mediciones realizadas en el momento después del corte, sin tener en cuenta la plantilla, se presenta a continuación, con el fin de establecer de una manera más clara si se observan diferencias estadísticamente significativas entre los dos sistemas de corte, en las mediciones realizadas en el tiempo cero (después del corte).

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Pendiente	1	134557	134557	1.408	0.2435
Corte	1	339966	339966	3.556	0.0676
Intensidad	2	286637	143318	1.499	0.2373
Pendiente:Corte	1	87485	87485	0.915	0.3453
Pendiente:Intensidad	2	88874	44437	0.465	0.6321
Corte:Intensidad	2	153621	76810	0.803	0.4558
Pendiente:Corte:Intensidad	2	65464	32732	0.342	0.7124
Residuals	35	3345822	95595		

 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Se observa que, en este primer momento de mediciones, parece que solo el corte tiene alguna incidencia en la variación de los resultados de pérdida de suelo. Esto tiene sentido al observar que después del corte tanto en parejo como en entresaque, el cultivo cuenta con una capa importante de cobertura vegetal, asociada con los restos de hojas perdidas por la planta a través de su ciclo productivo, además en el caso del corte por parejo, se hace un “encalle”, es decir se cubren los espacios entre plantas, distribuyendo los restos de hojas del cultivo de forma uniforme. Tradicionalmente en corte por entresaque no se realiza limpieza, por lo cual esta cobertura permanece más o menos constante a lo largo del ciclo productivo, por su parte, en el corte por parejo al ser un manejo más tecnificado se realizan a veces algunas prácticas para limpiar el espacio entre plantas.

En Cundinamarca, aunque ya se presenta la tendencia de realizar cortes por parejo, las prácticas de limpieza de cobertura vegetal en el cultivo a lo largo del ciclo productivo no son muy comunes, y aun cuándo se realizan no son muy agresivas. En el caso específico de estudio, el agricultor realiza algunas prácticas de limpieza, como el encalle mencionado anteriormente, sin embargo, no se observan diferencias claras entre la cobertura vegetal, en ambos sistemas de corte. Al realizar la comparación de medias entre los niveles de los factores, se observa que solo el corte presenta algún grado de diferencia estadísticamente significativa al comparar el corte por parejo y por entresaque, mientras, que los otros

factores (pendiente y boquilla), no presentaron diferencias estadísticamente significativas en el comportamiento de la pérdida de suelo.

§Pendiente

	diff	lwr	upr	p adj
Fuerte-Suave	105.8917	-83.18036	294.9637	0.263523

Pérdida de Suelo Promedio P. Fuerte (kg/ha)	195.21
Pérdida de Suelo Promedio P. Suave (kg/ha)	76.36

§Corte

	diff	lwr	upr	p adj
Parejo-Entresaque	168.3167	-20.75536	357.3887	0.0793711

Pérdida de Suelo Promedio Entresaque (kg/ha)	41.33
Pérdida de Suelo Promedio Parejo (kg/ha)	230.24

§Intensidad

	diff	lwr	upr	p adj
I79-I31	148.59437	-130.4921	427.6809	0.4036326
I79-I31	175.84500	-103.2415	454.9315	0.2846401
I79-I45	27.25062	-251.8359	306.3371	0.9691137

Pérdida de Suelo Promedio I31 (kg/ha)	14.41
Pérdida de Suelo Promedio I45 (kg/ha)	181.18
Pérdida de Suelo Promedio I79 (kg/ha)	211.77

▪ **Segundo momento: Intermedio**

En el momento intermedio, correspondiente a tres meses después del corte, se observa que los datos presentan una dependencia a las variaciones de pendiente, tendencia que no se había observado en el análisis exploratorio desarrollado en el capítulo 2, en el que se pretendía evaluar cuál había sido el comportamiento de la pérdida de suelo en comparación con sus factores. A los tres meses, tanto el corte por parejo, como el corte por entresaque tienen plantas con una altura aproximada de 50 cm sobre el suelo, aunque aún no se han cerrado calles, ya se ofrece algún tipo de protección inicial, en especial respecto al golpe de las gotas de lluvia contra el suelo. Por otra parte, parece que, en este momento de medición, el corte no representa una clara diferencia entre ambos sistemas de manejo, lo que se evidencia en los resultados de los análisis obtenidos presentados a continuación:

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Pendiente	1	65486	65486	11.779	0.00155	**
Corte	1	15265	15265	2.746	0.10644	
Intensidad	2	49839	24920	4.482	0.01849	*
Pendiente:Corte	1	19319	19319	3.475	0.07071	.
Pendiente:Intensidad	2	25583	12791	2.301	0.11513	
Corte:Intensidad	2	5044	2522	0.454	0.63901	
Pendiente:Corte:Intensidad	2	2026	1013	0.182	0.83419	
Residuals	35	194576	5559			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Se observa que en este caso la variación entre pérdida de suelos se explica principalmente debido a los cambios de pendiente, seguido por la erosividad de la intensidad de la precipitación simulada con el cambio de boquilla, y otro factor que se resalta en una menor medida es la interacción entre la pendiente y el corte, en dónde se observa alguna influencia de esta combinación sobre los datos medidos de pérdida de suelo. La diferenciación de medias por medio de la prueba Tukey, se presenta a continuación:

\$Pendiente					
	diff	lwr	upr	p adj	
Fuerte-Suave	73.8725	27.55585	120.1891	0.0026109	
Pérdida de Suelo Promedio P. Fuerte	(kg/ha)	104.90			
Pérdida de Suelo Promedio P. Suave	(kg/ha)	21.99			
\$Corte					
	diff	lwr	upr	p adj	
Entresaque-Parejo	35.66667	-10.64998	81.98331	0.1270942	
Pérdida de Suelo Promedio Entresaque	(kg/ha)	83.46			
Pérdida de Suelo Promedio Parejo	(kg/ha)	43.43			
\$Intensidad					
	diff	lwr	upr	p adj	
I45-I31	20.91813	-47.449209	89.28546	0.7368392	
I79-I31	76.37000	8.002666	144.73733	0.0257199	
I79-I45	55.45188	-12.915459	123.81921	0.1311077	
Pérdida de Suelo Promedio I31	(kg/ha)	27.05			
Pérdida de Suelo Promedio I45	(kg/ha)	50.53			
Pérdida de Suelo Promedio I79	(kg/ha)	112.76			

La comparación de medias realizada con la prueba Tukey resalta la diferencia entre mediciones realizadas en los dos rangos de pendiente y entre las mediciones realizadas con las intensidades menor y mayor (I31 e I79). Al observar la comparación de medias entre la interacción pendiente – corte, se determina que la mayor diferencia entre

tratamientos se presenta en las pérdidas de suelo en pendiente fuerte en corte por entresaque y las realizadas en pendiente suave en corte por parejo. Otras comparaciones interesantes son las que se presentan en la interacción de pendiente e intensidad, en donde se resaltan diferencias entre la pendiente fuerte y la I79, el cual se asume que es el caso más fuerte de pérdida de suelo, y pendiente suave con I31, siendo considerado como el caso en el que se presentan menores pérdidas de suelo.

Otras comparaciones por parejas de tratamientos que presentaron estimativos menores de 0,05 son las mediciones de pendiente fuerte con I79 y pendiente suave con esta misma intensidad, resaltando no sólo la diferencia entre mediciones realizadas en los dos rangos de pendiente en este momento, sino la relevancia que tiene la I79 al representar la mayor intensidad de precipitación y por ende simula la lluvia con mayor energía cinética. Otra diferencia de medias importante que se resalta en el momento intermedio es la correspondiente entre la pendiente fuerte con I79 y la pendiente fuerte con I31, comparando los dos valores extremos de precipitación simulada, y destacando que la diferencias entre la boquilla de menor tamaño y la de mayor tamaño se evidencia de una forma más clara en pendientes fuertes. Por último, se resalta la diferencia de medias correspondiente a la interacción entre el sistema de corte y la intensidad, específicamente al comparar mediciones en corte por entresaque con I79 y corte por parejo con I31, en donde se destaca nuevamente la influencia de las boquillas de mayor y menor energía cinética, además de contrastar los dos sistemas de manejo.

- **Tercer momento: Antes del corte**

El análisis de las mediciones de pérdida de suelo realizadas en cada momento de medición de manera independiente se finaliza con la diferencia obtenida entre factores en el momento antes del corte, en este caso correspondiente a los 6 meses después del corte, tiempo en el cual el cultivo ya ha realizado el cierre de calles. En este caso solo se observó una diferencia en la variación de la pérdida del suelo en la interacción pendiente – corte, más no sobresalieron diferencias claras en ningún factor por separado. Se resalta además que en este caso la intensidad de la precipitación presenta una menor influencia sobre la pérdida de suelo, al tener un desarrollo mayor de cultivo. Los resultados obtenidos para análisis de parcelas subdivididas en R se presentan a continuación:

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Residuals	1	2880	2880		
Error: Within					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Pendiente	1	56	56	0.019	0.892034
Corte	1	96	96	0.032	0.858582
Intensidad	2	12461	6230	2.096	0.138173
Pendiente:Corte	1	43485	43485	14.626	0.000517 ***
Pendiente:Intensidad	2	484	242	0.081	0.921949
Corte:Intensidad	2	353	176	0.059	0.942514
Pendiente:Corte:Intensidad	2	7568	3784	1.273	0.292697
Residuals	35	104062	2973		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

La diferenciación de medias por medio de la prueba Tukey, se presenta a continuación, donde nuevamente no se resalta el efecto de los factores de manera independiente sobre la variación en las mediciones de pérdida de suelo:

\$Pendiente				
	diff	lwr	upr	p adj
Fuerte-Suave	2.152083	-29.75754	34.06171	0.8919661
Pérdida de Suelo Promedio P. Fuerte (kg/ha) 43.97				
Pérdida de Suelo Promedio P. Suave (kg/ha) 41.55				
\$Corte				
	diff	lwr	upr	p adj
Parejo-Entresaque	2.825417	-29.08421	34.73504	0.8584922
Pérdida de Suelo Promedio Entresaque (kg/ha) 41.18				
Pérdida de Suelo Promedio Parejo (kg/ha) 44.35				
\$Intensidad				
	diff	lwr	upr	p adj
I45-I31	24.61687	-22.484466	71.71822	0.4168329
I79-I31	39.02375	-8.077591	86.12509	0.1207051
I79-I45	14.40687	-32.694466	61.50822	0.7369803
Pérdida de Suelo Promedio I31 (kg/ha) 18.95				
Pérdida de Suelo Promedio I45 (kg/ha) 46.58				
Pérdida de Suelo Promedio I79 (kg/ha) 62.75				

Al comparar las medias de la interacción pendiente – corte, se observa que las mayores diferencias estadísticas se presentan en los resultados de pérdida de suelo obtenidos para las parejas de tratamientos pendiente fuerte con por corte entresaque y pendiente suave con corte entresaque, y al comparar los resultados de las combinaciones de factores pendiente suave con corte parejo y pendiente suave con corte por entresaque. Los valores

medios de pérdida de suelo, para esta interacción de factores se presentan en la Tabla 3-2. Por una parte, se observa que en este caso la variación de la pendiente es representativa para el corte por entresaque, más no en el corte por parejo, por otra parte, al comparar los lotes con rangos de pendiente suave, se observa una diferencia entre los dos sistemas de corte, no así para el caso del rango de pendiente fuerte, indicando que las pérdidas en pendiente fuerte a los 6 meses del corte no dependieron del sistema de corte. Por su parte en pendiente suave si se resaltaron diferencias entre el entresaque y el parejo. Dichas comparaciones se presentan a continuación:

`Pendiente:Corte`				
	diff	lwr	upr	p adj
Fuerte:Parejo-Suave:Entresaque	4.9775000	-54.949376	64.90438	0.9959786
Fuerte:Entresaque-Suave:Entresaque	62.3500000	2.423124	122.27688	0.0388140
Suave:Parejo-Suave:Entresaque	63.0233333	3.096457	122.95021	0.0361312
Fuerte:Entresaque-Fuerte:Parejo	57.3725000	-2.554376	117.29938	0.0647789
Suave:Parejo-Fuerte:Parejo	58.0458333	-1.881043	117.97271	0.0605545
Suave:Parejo-Fuerte:Entresaque	0.6733333	-59.253543	60.60021	0.9999898

Tabla 3-2: Valores medios de la interacción de factores corte-pendiente. Momento Antes del corte (6 meses después del corte)

Valor medio pérdida de suelo (kg ha ⁻¹)		P (Pendiente)	
		Fuerte	Suave
C (Corte)	P (Parejo)	11,78	76,92
	E (Entresaque)	76,17	6,19

3.2.2 Parcelas subdivididas con análisis de medidas repetidas en el tiempo

Con el fin de observar otro tipo de tendencias de una forma más lineal, se realizó una regresión teniendo en cuenta las características cualitativas de los factores. Así se utilizó la precipitación aplicada sobre la parcela en mm en los 15 minutos de simulación, como el factor intensidad de precipitación, la inclinación del terreno en °, como el factor pendiente, el porcentaje de corte, asociado al factor corte, y el tiempo en meses desde el corte, hasta la medición, como el factor momento. Se obtuvo la siguiente expresión:

$$SP = -1067,32 - 65,57 M + 26,66 P + 0,76 I + 12,1 PC \quad (3.1)$$

Error estándar: 556,84

Coefficiente de correlación: 0,42

Coefficiente de determinación: 0,18

De la Ecuación (3.1), se obtiene una expresión que no representa de forma adecuada la pérdida de suelo en función de los factores de variación, expresados en términos cualitativos con su propiedad más característica, sin embargo, se observa una tendencia en cuanto a la relación directa que se presenta entre las pérdidas de suelo, con la lámina aplicada a la parcela de medición, con la inclinación del terreno y con el porcentaje de corte (entre mayor sea el porcentaje de corte, mayores son las pérdidas de suelo) y la relación inversa presentada con el momento de la medición, presentando una tendencia a reducir las pérdidas a medida que el cultivo se desarrolla.

A los experimentos en los que se realiza más de una medición de una variable sobre el mismo individuo o unidad experimental se les denomina experimentos con medidas repetidas (Correa, 2004). Se realizó otro tipo de análisis en el que se incluyeron todos los datos de corte por entresaque y momento, esta vez teniendo en cuenta el análisis de medidas repetidas. Para este análisis no se incluyeron los datos correspondientes a plantilla, ya que no cumplen con la repetición en el tiempo. Este análisis se obtuvo con el software SAS, por medio del procedimiento de modelos mixtos y el análisis de efectos fijos, para evaluar la relevancia de los factores y sus interacciones sobre la pérdida de suelo. Los factores aparecen por su primera letra, luego C corresponde a corte, E a entresaque y P a parejo. P, como factor, corresponde a pendiente, con sus categorías F (Fuerte) y S (Suave). I es la intensidad de precipitación, como se explicó anteriormente según el valor aproximado de intensidad se identifican sus niveles como I31, I45 e I79. M corresponde a momento, con las categorías D (Después del corte), I (Intermedio, a los tres meses del corte), y A (Antes del corte, a los seis meses del corte). Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 3-3.

Se observa que en este caso los valores del estimativo P menores a 0,05 son solamente el factor Intensidad y la interacción de factores momento y corte. Nuevamente no se observa una tendencia del comportamiento de la pérdida de suelo en función de la

pendiente. Para analizar de una manera más clara las diferencias presentes entre categorías de los distintos factores y sus interacciones, se realizó la comparación de medias, obtenida en el mismo procedimiento de modelos mixtos de SAS. El procedimiento compara diferencias de medias de mínimos cuadrados de cada factor y de las posibles interacciones entre factores. Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 3-4.

Tabla 3-3: Resultados análisis de efectos fijos. Parcelas subdivididas y análisis de medidas repetidas.

Efecto	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F
P	1	11,8	2,10	0,1732
C	1	11,8	1,17	0,3019
C*P	1	11,8	0,01	0,9072
I	2	36,7	4,63	0,0161
P*I	2	36,7	1,12	0,3378
C*I	2	36,7	1,05	0,3585
C*P*I	2	36,7	0,39	0,6771
M	2	70,2	2,76	0,0699
M*P	2	70,2	1,04	0,3582
M*C	2	70,2	3,92	0,0243
M*C*P	2	70,2	2,24	0,1143
M*I	4	70,2	0,84	0,5016
M*P*I	4	70,2	0,42	0,7905
M*C*I	4	70,2	0,76	0,5566
M*C*P*I	4	70,2	0,42	0,7961

Se puede apreciar en la Tabla 3-4 que, bajo este método de comparación de medias, no se identifican claras diferencias estadísticas en la mayoría de factores, con excepción de los datos de pérdida de suelo con I31 e I79, (significancia 0,05), y también se destaca la diferencia entre medias en los resultados asociados con el momento después y el momento antes del corte. Para resaltar el efecto de la interacción momento-corte, la cual fue identificada por el modelo, como otro factor de importancia en la explicación de la variabilidad de resultados de pérdida de suelos, se presenta en la Tabla 3-5 la comparación de medias de mínimos cuadrados de esta interacción. Se resaltan aquellas combinaciones momento del cultivo y sistema de corte, en donde se evidencian las diferencias más claras, dónde se resalta que las diferencias entre medias se deben principalmente a la

comparación de pérdidas de suelos en el momento después del corte en corte por parejo, con todas las otras combinaciones de corte y momento posibles.

Tabla 3-4: Diferencias de medias de mínimos cuadrados para la variable pérdida de suelo según factores sistema de corte, pendiente, boquilla y momento del corte.

Efecto	Valor medio pérdida de suelo (kg ha ⁻¹)		
	Categorías		
C (Corte)	E (Entresaque)	P (Parejo)	
	55,32	106,01	
P (Pendiente)	F (Fuerte)	S (Suave)	
	114,69	46,64	
I (Intensidad)	I31	I45	I79
	20,14	92,76	129,09
M (Momento)	D (Después)	I (Intermedio)	A (Antes)
	135,78	63,45	42,76

Efecto	M	C	P	I	_M	_C	_P	_I	Estimador	Error estándar	DF	Valor t	Pr > t
P			F					S	60,6388	41,8246	11,8	1,45	0,1732
C		E						P	-45,1585	41,8246	11,8	-1,08	0,3019
I				I31				I45	-64,7098	32,4805	36,7	-1,99	0,0538
I				I31				I79	-97,0796	32,4805	36,7	-2,99	0,0050
I				I45				I79	-32,3698	32,4805	36,7	-1,00	0,3255
M	D							I	64,4533	41,0057	44,9	1,57	0,1230
M	D							A	82,8835	36,5803	90,5	2,27	0,0258
M	I							A	18,4302	41,0057	44,9	0,45	0,6553

Se observaron también diferencias estadísticas significativas en la interacción entre corte y pendiente al comparar todas las posibles parejas entre los dos sistemas de corte, es decir se observan diferencias entre entresaque fuerte con parejo fuerte y parejo suave, y los datos de entresaque suave, con parejo fuerte y parejo suave, resaltando el efecto del sistema de corte sobre las mediciones obtenidas de pérdida de suelo. En cuanto a la interacción de factores pendiente e intensidad, se presentan varias diferencias significativas, en especial al comparar dos tipos de intensidad diferentes, lo cual es claro al haber determinado que es el factor que mejor explica la variabilidad representada en los datos de pérdida de suelo. Lo mismo ocurre en la interacción corte – intensidad, dónde al

comparar pares de tratamientos se observan diferencias significativas especialmente entre valores de intensidad.

Por su parte al comparar pares de tratamientos de factores Momento y Pendiente, se observaron diferencias en la pendiente en el momento antes del corte, como también se reflejó en el análisis hecho anteriormente por cada momento de manera independiente, además se resaltan nuevamente diferencias asociadas a la comparación entre el momento intermedio y las mediciones realizadas a los 6 meses del corte. En la interacción momento - intensidad, el análisis dio como resultado diferencias estadísticas significativas entre medias al comparar todas sus posibles interacciones entre niveles.

Tabla 3-5: Diferencias de medias por mínimos cuadrados para pérdida de suelo según interacción de factores corte y momento.

Valor medio pérdida de suelo (kg/ha)		M (Momento)		
		D (Después)	I (Intermedio)	A (Antes)
C (Corte)	P (Parejo)	230,24	43,43	44,35
	E (Entresaque)	41,33	83,46	41,18

Efecto	M	C	P	B	_M	_C	_P	_B	Estimador	Error estándar	DF	Valor t	Pr > t
M*C	D	E			D	P			-168,32	61,9569	48,8	-2,72	0,0091
M*C	D	E			I	E			-37,5383	57,9908	44,9	-0,65	0,5207
M*C	D	E			I	P			-1,8717	61,9569	48,8	-0,03	0,976
M*C	D	E			A	E			0,1379	51,7323	90,5	0	0,9979
M*C	D	E			A	P			-2,6875	61,9569	48,8	-0,04	0,9656
M*C	D	P			I	E			130,78	61,9569	48,8	2,11	0,0399
M*C	D	P			I	P			166,44	57,9908	44,9	2,87	0,0062
M*C	D	P			A	E			168,45	61,9569	48,8	2,72	0,009
M*C	D	P			A	P			165,63	51,7323	90,5	3,2	0,0019
M*C	I	E			I	P			35,6667	61,9569	48,8	0,58	0,5675
M*C	I	E			A	E			37,6763	57,9908	44,9	0,65	0,5192
M*C	I	E			A	P			34,8508	61,9569	48,8	0,56	0,5763
M*C	I	P			A	E			2,0096	61,9569	48,8	0,03	0,9743
M*C	I	P			A	P			-0,8158	57,9908	44,9	-0,01	0,9888
M*C	A	E			A	P			-2,8254	61,9569	48,8	-0,05	0,9638

3.2.3 Análisis de covariables

Para resaltar el efecto de las propiedades físicas, químicas y las variables asociadas al rendimiento y a la cobertura sobre el suelo, se realizó una matriz de correlación lineal, para determinar aquellas variables que presentan una mejor correlación con los resultados de pérdida de suelos. Además se incluyeron los factores como variables cuantitativas asociadas, de esta forma, la pendiente, en lugar de tener en cuenta su clasificación como fuerte o suave, se incluye en este análisis como el grado de inclinación; el corte, se relaciona con el porcentaje de corte, el cual es igual a 100 en los lotes manejados por parejo y cercano a 80 en los lotes de entresaque; la intensidad de precipitación, se expresa en este análisis como la cantidad de precipitación en mm, aplicada a la parcela de medición en 15 minutos, correspondientes al tiempo de duración de cada ensayo; por último el momento se expresa en meses de esta forma después del corte se le da un valor de 0 meses, el momento intermedio tendría un valor de 3 meses y el que se definió como antes del corte, correspondería en este caso a 6 meses.

Se observó que la mayor correlación directa con los datos de pérdida de suelo se presentó en propiedades físicas como la densidad real, el contenido de limo, y el contenido de arenas muy finas, por parte de las propiedades químicas se observaron las más altas correlaciones directas con el contenido de Potasio y la conductividad eléctrica (ambas variables altamente correlacionadas), por último se presentaron correlaciones notables en mediciones de rendimiento en el cultivo, y porcentaje de corte, valores que están también muy ligados entre sí. De los datos presentados anteriormente, se observa que la variabilidad entre lotes no es muy alta, característica que se esperaba para poder garantizar que los factores de selección tuvieran el mayor efecto posible sobre condiciones similares de suelo. Sin embargo, los datos de rendimiento al estar altamente ligados con el tipo de corte, presentaron un correlación importante (0,24), indicando que a un mayor rendimiento se presentaron mayores valores de pérdida de suelo, aunque el mayor rendimiento ofrece una mayor protección al suelo, esta relación directa se ve reflejada en la mayor pérdida de suelo en corte por parejo que en corte por entresaque, en donde también se presentan mayores rendimientos, en este mismo sentido se obtuvo una correlación directa con el porcentaje de corte (0,25). Otra variable de interés en este caso es el peso de cobertura vegetal, valor que presentó una relación inversa con los valores

de pérdida de suelos (-0,45), y una correlación lineal aún más significativa con el índice de cobertura, el cual se definió como el porcentaje de cobertura presentado sobre la parcela (-0,54), a su vez estos dos valores presentaron una alta correlación lineal entre sí (0,54) indicando la importancia que tiene la cobertura como protección del suelo ante eventos fuertemente erosivos de precipitación.

En cuanto a variables físicas, la mayor correlación se presentó de forma inversa con el diámetro medio ponderado (-0,41), lo cual es un resultado esperado, ya que esta variable indica el grado de agregación y estabilidad del suelo ante fuerzas externas como la precipitación. Otras relaciones inversas relevantes se presentaron entre la pérdida de suelo y la porosidad total (-0,39), el contenido de arcilla (-0,36) y el porcentaje de saturación del suelo (-0,38), este último valor se encuentra estrechamente asociado con la porosidad total, factor importante que indica el grado de degradación del suelo, en especial en cuánto a problemas de compactación que pueden reducir la permeabilidad y la velocidad de infiltración del suelo. Por otra parte, se resalta la relación inversa con el contenido de arcilla, ya que, aunque corresponden a las partículas más pequeñas de suelo, son también las que brindan los enlaces químicos y estructurales más fuertes. Por su parte, el contenido de limo presenta una relación directa con la pérdida de suelo (0,39), al igual que la arena muy fina (0,31) indicando la importancia de estos tamaños de partícula, al ser solo un poco más grandes que la arcilla, pero no contar con su capacidad de crear enlaces para ser estructuralmente más fuerte al momento en el que se rompen agregados del suelo y ser arrastrados por escorrentía hídrica superficial, generando una impermeabilización de los poros del suelo, disminuyendo la capacidad de infiltración y causando mayor escorrentía. Una covariable con la se esperaba se hubiera tenido una correlación significativa es la humedad inicial del suelo, al momento de realizar la medición de erosión hídrica superficial, la cual correspondió en un 62% a valores cercanos a capacidad de campo, según la curva de retención de humedad, en un 17% de las mediciones, sobrepasó el umbral de saturación, y en el 11% por debajo del punto de marchitez permanente, finalmente el 10% de las mediciones, correspondieron a valores de humedad dentro del rango de agua aprovechable.

Por último, en las variables químicas se resalta la relación entre el suelo perdido y el contenido de materia orgánica (-0,24), indicando que a mayores contenidos de materia

orgánica se presentan menores pérdidas de suelo, lo cual también se refleja en la importancia que tiene esta propiedad en las condiciones físicas del suelo, en especial en la porosidad total. Se observa una relación directa con variables como la conductividad eléctrica y el contenido de K (0,25 y 0,37 respectivamente), indicando que probablemente las propiedades dispersantes del K puedan generar una mayor pérdida de suelo. Otra propiedad química que se destacó, y que se encuentra por lo general altamente ligada con el contenido de materia orgánica, es el contenido de P, presentando también una relación inversa con los resultados de pérdida de suelos (-0,22).

Se realizó una estimación de las covariables que tienen mayor relevancia o significancia dentro de un modelo lineal, en el que se asocian las pérdidas de suelo con las distintas propiedades determinadas. De esta forma se tuvo en cuenta la matriz de correlación, para eliminar aquellas variables que son resultado de una combinación lineal de otras, o las que presentan alta correlación entre sí, con el fin de no tener efectos repetitivos sobre la determinación de pérdidas de suelo, dejando las siguientes variables: Momento, definido como 0, 3 o 6 meses según el tiempo que pasó entre el corte y la medición. Intensidad de precipitación, presentado como la cantidad de agua en mm que cae sobre la parcela de medición. Inclinación, correspondiente al ángulo medido en campo expresado en °. IC, correspondiente al índice de cobertura, expresado como el porcentaje de suelo cubierto en la parcela de medición. Humedad, es el contenido gravimétrico de agua en el suelo antes de realizar cada medición. PC, correspondiente al porcentaje de corte, variable que representa el factor corte. DPM, valor de diámetro medio ponderado, indicador de la estabilidad estructural del suelo. Arcilla y limo, como los contenidos de estas partículas expresados en porcentaje. Los contenidos de arena se diferencian como arena gruesa (AG), arena media (AM), arena fina (AF) y arena muy fina (AMF). PS es el porcentaje de saturación del suelo y AA el agua aprovechable, obtenida de la diferencia del contenido de humedad en capacidad de campo y punto de marchitez permanente, desarrollado en laboratorio. PT es la porosidad total del suelo. Ib el valor determinado en campo de infiltración básica. De esta forma en R se definieron las variables que tuvieron mayor representación en la variación de las mediciones, como se presenta a continuación:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)						
(Intercept)	39886.7773	17980.9486	2.218	0.02814	*					
Momento	-21.4327	17.1923	-1.247	0.21460						
Intensidad	26.6516	6.6366	4.016	9.59e-05	***					
Inclinacion	35.5308	14.6258	2.429	0.01639	*					
IC	-986.8657	478.2593	-2.063	0.04090	*					
Humedad	0.1429	6.2105	0.023	0.98168						
PC	-41.9663	26.1358	-1.606	0.11058						
DPM	-851.6193	403.9256	-2.108	0.03677	*					
Arcilla	-126.0496	83.5088	-1.509	0.13343						
Limo	-216.1587	112.3815	-1.923	0.05644	.					
AMG	-112.7229	134.8049	-0.836	0.40446						
AG	-97.7002	131.8569	-0.741	0.45995						
AM	-827.3390	259.6371	-3.187	0.00177	**					
AF	346.1358	131.6359	2.629	0.00950	**					
AMF	-93.6344	124.3745	-0.753	0.45280						
PS	-32.4813	47.6455	-0.682	0.49653						
AA	181.7080	93.3031	1.948	0.05346	.					
PT	-61.2685	30.9898	-1.977	0.04999	*					
Ib	-0.0209	8.6405	-0.002	0.99807						
pH	-2075.2482	829.6674	-2.501	0.01352	*					
CE	-743.5898	1200.6330	-0.619	0.53670						
MO	-263.0022	168.3017	-1.563	0.12037						
P	-30.4484	11.0939	-2.745	0.00685	**					
Ca	145.4548	90.8006	1.602	0.11141						
Mg	-825.5075	728.9762	-1.132	0.25938						
K	-321.4664	905.9607	-0.355	0.72324						
Na	-3319.3078	5275.7056	-0.629	0.53026						

Signif. codes:	0	'***'	0.001	'**'	0.01	'*'	0.05	'.'	0.1	'

Se observa que la variable más representativa es la intensidad de precipitación, la cual en este caso se expresó como la lámina de agua en mm aplicada en los 15 minutos de simulación, resaltando nuevamente la importancia de este factor dentro de los niveles de pérdida de suelo. Otros factores de alta significancia fueron el contenido de arena media (AM), el contenido de arena fina (AF) y los contenidos de fósforo (P), las dos propiedades están altamente relacionadas con la formación de agregados y en el caso de arenas finas, su comportamiento se considera similar en algunos casos a los limos, siendo partículas de tamaño pequeño que no presentan enlaces con otras partículas al no tener carga química, y por lo tanto se asocian con una mayor susceptibilidad a la erosión. Por otra parte, el fósforo muestra también una significancia estadística en la variación de mediciones de pérdida de suelo, al ser una propiedad ampliamente ligada con los contenidos de materia orgánica y la calidad del suelo. Y por último con un efecto un poco menor sobre las pérdidas

de suelo se resaltan la inclinación, el índice de cobertura, el diámetro medio ponderado y el pH del suelo.

Se debe tener en cuenta que algunas variables altamente representativas en el fenómeno de erosión como es el caso del contenido de limo, el contenido de arcilla o el contenido de materia orgánica, no presentan una significancia estadística no por qué no estén relacionadas con el fenómeno, sino porque la selección de los lotes se realizó pensando en que las pérdidas del suelo se asociaran más con las variaciones en los factores de diseño, que con covariables relacionados con las propiedades físicas y químicas del cultivo. Al realizar una regresión lineal con estas propiedades indicadas como estadísticamente representativas se obtuvo la siguiente expresión, presentada en la Ecuación (3.2):

$$SP = 4424,91 + 26,65 I + 17,84 IN - 686,71 IC - 51,5 DPM - 173,52 AM + 312,98 AF - 32,56 PT - 399,27 pH - 13,09P \quad (3.2)$$

Error estándar: 455,8

Coefficiente de correlación: 0,684

Coefficiente de determinación: 0,468

Dónde *SP* corresponde a las mediciones de suelo perdido en gramos, correspondiente a cada una de las mediciones. *I* es la lámina de agua aplicada en mm con las distintas boquillas durante quince minutos de duración de las mediciones. *IN* es la inclinación de la parcela en °. *IC* es el índice de cobertura, expresado en %. *DPM* es el diámetro medio ponderado obtenido expresado en mm. *AM* es el contenido de arena media en %. *AF* es el contenido de arena fina en %. *PT* es la porosidad total, expresada en %. *pH* es el nivel de pH determinado en el suelo. *P* es el contenido de fósforo en suelo, expresado en mg kg⁻¹. Aunque la Ecuación (3.2), representa un modelo que no se ajusta de manera correcta a la pérdida de suelo estudiada, si se observan y confirman nuevamente la importancia de estas tendencias en cuanto a la explicación del fenómeno asociado. Además, se resalta el papel de los factores de precipitación y pendiente y se confirma que la linealidad entre algunas covariables y la pérdida de suelo se está relacionando en gran parte a aquellas variables que presentaron mayor dispersión en los lotes de trabajo, ignorando algunas que se consideran importantes en el fenómeno de erosión, las cuales en algún modo no

tuvieron valores distintos en los lotes de trabajo. Para complementar la expresión presentada en la Ecuación (3.2) se agregaron los demás factores de diseño, de esta forma se incluyó el momento de medición y el porcentaje de corte, obteniendo la Ecuación (3.3)

$$SP = 3916,02 - 22,86 M + 26,66 B + 175,21 I - 700 IC - 50,79 DPM - 158,99 AM + 277,13 AF - 27,36 PT - 397,16 pH - 10,36 P + 4,3 PC \quad (3.3)$$

Error estándar: 455,14

Coefficiente de correlación: 0,69

Coefficiente de determinación: 0,48

Dónde M es el momento, expresado en meses desde el corte hasta la medición. PC es el porcentaje de corte. Aunque en este caso se logran mejorar los coeficientes para evaluar la expresión, se observa que el modelo lineal no es el adecuado para representar las pérdidas de suelo en función de los factores de diseño estadístico y algunas covariables. Sin embargo, nuevamente se resalta la importancia de ver las tendencias en cuanto a signos positivos y negativos, resaltando la relación directa de la lámina aplicada sobre la parcela, la inclinación del terreno, el contenido de arena fina, y el porcentaje de corte, con la pérdida de suelo, demostrando que al incrementar cualquiera de estos valores, se tienden a incrementar las pérdidas de suelo. Por su parte se resaltan relaciones inversas de la pérdida de suelo con el momento de la medición, el índice de cobertura, el diámetro medio ponderado, el contenido de arena media, la porosidad total, el pH y el contenido de fósforo, donde algunas de sus propiedades funcionan como características que se buscan mejorar con el fin de contribuir a las condiciones del suelo.

3.3 Adaptación al modelo USLE

Como se mencionó en la descripción metodológica, existen diversos modelos de pérdida de suelo cuya base es la ecuación universal de pérdida de suelos USLE, la cual expresa las pérdidas de suelo, en función de la erosividad de la lluvia, la erodabilidad del suelo, la cobertura, las prácticas de cultivo, y la pendiente. El modelo USLE se muestra a continuación:

$$T = RKCLS \quad (3.4)$$

Dónde T es la pérdida media de suelo generalmente expresada de forma anual (expresado en unidades escogidas para K , y período abarcado en R , $\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$). R es el factor de erosividad de la lluvia en $\text{MJ cm ha}^{-1} \text{h}^{-1}$, para un evento específico de precipitación, se calcula, obteniendo la energía cinética de la precipitación y luego multiplicándolo por la precipitación en el intervalo de tiempo específico (para cada una de las boquillas se calculó este valor). K es el factor de erodabilidad del suelo expresado en $\text{t ha h MJ}^{-1} \text{ha}^{-1} \text{cm}^{-1}$, se calcula en función del porcentaje de limo, arena muy fina, arcilla, materia orgánica, estabilidad estructural, e infiltración básica, corresponde al valor de la erosión por unidad de índice de erosión pluvial, para un suelo determinado en barbecho continuo, con una pendiente del 9% y una longitud de declive de 22,1 m (Wishmeier & Smith, 1978). LS es un factor asociado con la longitud y la inclinación de la pendiente, L se refiere a la longitud expresada en m y S a la pendiente en m m^{-1} , en este caso se toma la longitud de la parcela de medición y la inclinación medida en campo. Por su parte el factor C , correspondiente a la relación entre las pérdidas de suelo en un terreno cultivado en condiciones específicas y las pérdidas correspondientes para ese suelo en barbecho continuo (Wishmeier & Smith, 1978), factor que se determina en este estudio con los valores de suelo perdido, el cual se relaciona con la cubierta vegetal y el manejo de cultivo, por lo tanto, se obtiene un factor C para corte por entresaque y uno para corte por parejo. Existe un último factor asociado a la técnica de conservación aplicada, por ejemplo, en cultivos en contorno, fajas o terrazas, el cual tampoco tiene unidades de medidas. Para fines prácticos no se considera este factor en el presente desarrollo, ya que se priorizará en la obtención del factor C , para distintas condiciones de manejo y desarrollo de cultivo en el caso de caña panelera.

3.3.1 Factor R erosividad de la lluvia

El factor R de erosividad corresponde a la sumatoria de los productos de las energías de todos los eventos de lluvias erosivas anuales con sus respectivas intensidades máximas en 30 minutos, lo cual da una idea de la agresividad con que la precipitación influye en el proceso de degradación del suelo por erosión hídrica (Wishmeier & Smith, 1978). Como un evento de lluvia erosiva se considera a toda precipitación igual o mayor que 12,7 mm de agua caída, separada por al menos 6 horas del evento anterior o posterior (Wishmeier & Smith, 1978). En rigor, el factor R utilizado debe ser el promedio de varios años de determinaciones. A fin de cuantificar con precisión la energía de la lluvia y su intensidad

máxima en 30 minutos, se requiere conocer idealmente el detalle de la dinámica horaria de la precipitación en su lapso de duración (Wishmeier & Smith, 1978). Para las tres intensidades con el uso de tres tamaños de boquillas en el simulador, se aplicó el método tradicional para la obtención del factor R . Se inicia con la aplicación de la Ecuación (3.5).

$$e = 0.119 + 0.0873 * \log I_m \quad (3.5)$$

Dónde I_m es la intensidad de la lluvia medida para un intervalo y entrega la energía de cada milímetro de agua caída en él. Esta fórmula es válida para intensidades de lluvia menor o iguales a 76 mm h^{-1} y se expresa en $\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (Wishmeier & Smith, 1978). En este caso se aplica la fórmula para las intensidades simuladas I31, que tiene una intensidad de $30,81 \text{ mm h}^{-1}$, de dónde se obtiene un valor de energía e de $0,25 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, y para I45, la cual da una intensidad de precipitación de $44,76 \text{ mm h}^{-1}$, con una energía e de $0,26 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Para I79, se asume un e igual a $0,283 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, el cual corresponde al valor que se estima para cualquier intensidad superior a 76 mm h^{-1} (Wishmeier & Smith, 1978). Luego se determina la energía total del intervalo multiplicando el factor e , determinado en la Ecuación (3.5) por el total de milímetros de agua caída en dicho intervalo de tiempo, como se presenta en la Ecuación (3.6)

$$E_i = e_i * pp_i \quad (3.6)$$

Dónde E_i es la energía total del intervalo i del evento de precipitación considerado, e_i , corresponde a la energía por milímetro, calculada en la Ecuación (3.5) y pp_i es el total de milímetros de lluvia caídos en el intervalo considerado (Wishmeier & Smith, 1978). Para este caso la cantidad de milímetros caídos corresponde a la intensidad por boquilla, mencionada anteriormente, aplicada en 15 minutos de simulación, que es el tiempo total en el que se llevó a cabo cada ensayo, obteniendo para I31, un pp_i de $7,7 \text{ mm}$ y un E_i de $1,92 \text{ MJ ha}^{-1}$. Para I45, un pp_i de $11,19 \text{ mm}$ y un E_i de $2,94 \text{ MJ ha}^{-1}$. Por último, para I79 se obtiene un pp_i de $19,69 \text{ mm}$ y un E_i de $5,57 \text{ MJ ha}^{-1}$. Finalmente se determina la intensidad máxima en 30 minutos, en este caso, con el fin de asociar cada medición de erosión en un momento dado, con este valor y poder despejar el factor C , se consideró cada precipitación como una lluvia de intensidad máxima de 30 minutos, de esta forma se obtiene el factor R como se expresa en la Ecuación (3.7)

$$R_i = E_i * I_i \quad (3.7)$$

Dónde E_i es el valor de energía total del intervalo calculado en la Ecuación (3.6) e I_i es la intensidad correspondiente a cada boquilla. Los valores R obtenidos para cada boquilla se expresan en $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, corresponden a 59,08 para I31, 131,79 para I45 y 438,87 para I79. Esta metodología desarrollada anteriormente se utilizó para despejar el factor C de cada una de las mediciones, con el fin de realizar estimaciones de este índice en el caso de entresaque, parejo, plantilla, y en los distintos tiempos asociados al corte.

Aunque en América Latina se tienen bastantes registros de lluvia, en especial en cuanto a valores de intensidad, no hay suficientes estaciones automáticas para desarrollar el cálculo del índice de erosividad de la lluvia R . Con el fin de facilitar la determinación de este factor se han desarrollado distintas metodologías, en las que se consigue alguna aproximación a este valor con registros mensuales o diarios de precipitación, entre estos se encuentra el índice de Fournier, en el que se relaciona la precipitación máxima de un año, dividido la cantidad media mensual de precipitación de ese mismo año. Así mismo existe una modificación de este índice, dónde se relaciona la sumatoria de la precipitación mes a mes de un año, dividido entre la precipitación total de ese año (Lobo & Gabriels, 2005). Con el fin de estimar la erosión potencial anual para corte por entresaque y parejo, se utilizó una expresión desarrollada por Rivera (1991), citada por Lince & Castro (2015), propuesta para el eje cafetero, que emplea el índice modificado de Fournier. Este tipo de expresiones permite estimar el factor R en función de la precipitación total anual de una estación climática, y aunque no corresponde al departamento de Cundinamarca, es una de las pocas expresiones de este tipo determinadas en Colombia. De esta forma el factor R correspondiente a la erosividad media anual para la región de estudio, se determinó por medio de la siguiente expresión:

$$R = \sum_1^{12} 38,4(IMF) + 28,3 \quad (3.8)$$

Dónde R es el factor de erosividad expresado en MJ mm ha^{-1} e IMF es el índice modificado de Fournier, descrito por medio de la siguiente ecuación:

$$IMF = \sum_1^{12} \frac{(P_i)^2}{P} \quad (3.9)$$

Dónde P_i es la precipitación del mes i , y P es la precipitación total del año. Al obtener el factor R anual, y los factores C , K y LS obtenidos previamente, se realiza una estimación de la erosión potencial para cada uno de los sistemas de corte y una aproximación a un testigo de suelo sin cobertura vegetal, al tener mediciones sobre un lote recién sembrado o plantilla.

3.3.2 Factor K erodabilidad del suelo

El factor de erodabilidad se determina de manera directa a través de una ecuación en dónde se incluyen los resultados obtenidos en la determinación de la textura, el contenido de materia orgánica, la estructura del suelo y la permeabilidad (Wishmeier & Smith, 1978). La expresión por medio de la cual se determina el factor K se presenta en la Ecuación (3.10)

$$K = 1,313 * \frac{\{[(2,1*10^{-4})*(12-MO)*M^{1,14}]+[3,25*(S-2)]+[2,5*(P-3)]\}}{100} \quad (3.10)$$

En dónde MO corresponde al porcentaje de materia orgánica del suelo, S es el código de estructura del suelo, P es el código de permeabilidad, y M es un factor dado por el producto de la suma de los porcentajes de limo y arena muy fina con la suma de los porcentajes de arena y limo (Mancilla, 2008). El valor K se expresa en $T ha h ha^{-1} MJ^{-1} cm^{-1}$.







- **Materia orgánica**

Según USLE, el porcentaje de materia orgánica oscila entre 0 y 4%, con valores de números enteros. Si el contenido fijado es más que el rango especificado se asume un 4% (Mancilla, 2008). Ya que el contenido de materia orgánica en los lotes trabajados siempre es mayor a 4%, se asume este valor para todas las mediciones.

▪ **Código de estructura del suelo S**

La determinación de la estructura del suelo se realiza por observación visual y tacto. Según la USLE, las categorías y códigos empleados son cuatro, como se observa en la Tabla 3-6. Debido a que la estructura del suelo en los lotes era en bloques, se asuma el código 4, de estructura USLE.

Tabla 3-6: Categoría de estructura USLE. (Wishmeier & Smith, 1978)

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

▪ **Código de permeabilidad del suelo P**

Para la permeabilidad del suelo, se asignan seis valores o códigos diferentes como se presenta en la Tabla 3-7 (Wishmeier & Smith, 1978). Para el caso de las mediciones realizadas en campo, se cuenta con datos de velocidad de infiltración e infiltración básica,

por lo tanto, se realiza la clasificación en las distintas categorías presentadas en la Tabla 3-7, con estos datos, ya que como registran diversos autores, tiene una relación directa con la permeabilidad del suelo.

Tabla 3-7: Categoría de permeabilidad USLE. (Wishmeier & Smith, 1978)

Código USLE	Categoría de permeabilidad
1	Rápida (>12,7 cm h ⁻¹)
2	Moderada a rápida (6,3 a 12,7 cm h ⁻¹)
3	Moderada (2 a 6,3 cm h ⁻¹)
4	Lenta a moderada (0,5 a 2 cm h ⁻¹)
5	Lenta (0,13 a 0,5 cm h ⁻¹)
6	Muy lenta (<0,13 cm h ⁻¹)

- **Factor *M***

El factor *M* se determina por medio de la Ecuación (3.11), la cuál es válida solamente para suelos que tienen máximo 70% de fracción limosa.

$$M = (\%limo + \%arena\ muy\ fina) * (100 - \%arcilla) \quad (3.11)$$

De la determinación de los factores indicados anteriormente y reemplazando en las Ecuaciones (3.11) y (3.10), se obtienen los valores del factor *K* de erodabilidad, para cada uno de los lotes de medición, presentados en la Tabla 3-8. Aun cuando se seleccionaron lotes dentro de una misma finca, buscando reducir la variabilidad espacial de propiedades físicas, se debe tener en cuenta que esta variabilidad dentro de los campos agrícolas es inherente a la naturaleza geológica de la formación de suelo, y en algunos casos, puede ser inducida por las prácticas de manejo (Monroy *et al.* 2017).

De acuerdo con la clasificación presentada por Moreno *et al.* (2017), tomada del SWCS (Soil and Water Conservation Society, 1995), los valores de erodabilidad presentados en la Tabla 3-8, corresponden a grados de erodabilidad de bajos a moderados, con susceptibilidad escasa a moderada al escurrimiento. Moreno *et al.* (2017) determinaron para suelos de textura franco-arcillosa a franco limosa, con estructura en bloques subangulares, valores de *K* de 0,24 a 0,27. Contreras *et al.* (2015) en conglomerados y

arenas aluviales, obtuvieron un K de 0,48, clasificando estos suelos como susceptibles al desprendimiento y la erosión. Generalmente se reportan altos índices de erodabilidad para vertisoles. Para tres suelos arcillosos Loch y Rosewell (1992), aplicando la metodología USLE reportaron valores de 0,4, 0,3 y 0,44 en comparación con valores de K presentados en el manual de la USLE para 23 suelos de los Estados Unidos sobre estaciones de investigación, dónde solo un tipo de suelo presentó un factor K mayor a 0,4 y solo para tres tipos de suelos, se obtuvieron valores de K mayores a 0,3 (Freebairn *et al.*, 1996)

Tabla 3-8: Factores K de erodabilidad del suelo para lotes de medición.

Corte	Pendiente	K (T ha h ha ⁻¹ MJ ⁻¹ cm ⁻¹)
Entresaque	Fuerte	0,15
	Suave	0,11
Parejo	Fuerte	0,07
	Suave	0,10
Plantilla	Fuerte	0,31
	Suave	0,41

3.3.3 Factor LS

Los factores LS asociados con características de la pendiente del terreno, se determinan de manera conjunta por medio de la Ecuación (3.12), la cual corresponde a la ecuación descrita por Arnoulds (1977), utilizada para eliminar la necesidad de incurrir en transformaciones de unidades, y poder asociar este factor a unidades del sistema internacional, en las cuales se han expresado los factores anteriores de erosividad de la lluvia y erodabilidad del suelo (Mancilla, 2008).

$$LS = \left(\frac{Y}{22,1}\right)^{0,6} * \left(\frac{S}{9}\right)^{1,4} \quad (3.12)$$

Dónde Y representa la longitud de la ladera en pendiente, y S es el porcentaje de inclinación. Las divisiones por 22,1 y 9, representan las respectivas razones de ladera consideradas sobre la longitud y el grado de pendiente de la parcela estándar USLE (Mancilla, 2008). Además, se observa, de acuerdo, a los exponentes de la Ecuación (3.12)

que el grado de inclinación del terreno tiene un peso relativo mayor que la longitud de la ladera (Mancilla, 2008). Para continuar con la asociación del factor *C* a las mediciones realizadas en los dos tipos de corte y en los tres momentos asociados al mismo, se reemplaza en la Ecuación (3.12) por un *Y* igual a 4,7 m, correspondiente a la longitud de la parcela de escorrentía instalada en campo para cada medición realizada, y *S* al valor de inclinación determinado en cada parcela instalada. De esta forma se obtienen los factores *LS* para cada uno de los lotes de medición, como se presenta en la Tabla 3-9.

Tabla 3-9: Factores *LS*, asociados a características de la pendiente, para lotes de medición.

Corte	Pendiente	LS
Entresaque	Fuerte	3,71
	Suave	1,13
Parejo	Fuerte	3,63
	Suave	1,16
Plantilla	Fuerte	3,13
	Suave	1,02

3.3.4 Estimación factor *C*

Al despejar el factor *C* de la Ecuación (3.4), se obtendría la expresión presentada en la Ecuación (3.13).

$$C = \frac{T}{RKLS} \quad (3.13)$$

Dónde *T* es la pérdida media anual de suelo (expresado en unidades escogidas para *K*, y período abarcado en *R*, ton ha⁻¹). *R* es el factor de erosividad de la lluvia, asociada a cada precipitación simulada, en MJ cm ha⁻¹ h⁻¹. *K* es el factor de erodabilidad del suelo expresado en t ha h MJ⁻¹ ha⁻¹ cm⁻¹, cuyos valores se presentaron en la Tabla 3-8. *LS* es el factor asociado con la longitud y la inclinación de la pendiente, de acuerdo con los valores presentados en la Tabla 3-9. Por su parte el factor *C*, es el que se relaciona con la cubierta vegetal y el manejo de cultivo. Al realizar el cálculo expresado en la Ecuación (3.13) para cada una de las mediciones realizadas, se obtienen valores *C* asociados a los dos sistemas de corte y a los momentos de medición, como se presentan en la Tabla 3-10.

Tabla 3-10: Factores C, estimados para sistemas de corte y momentos de medición.

Corte	Momento	Factor C	Promedios
Entresaque	Después del Corte (0 meses)	0,048	0,048
	Tiempo Intermedio (3 meses)	0,054	
	Antes del Corte - Cierre de calles (6 meses)	0,044	
Parejo	Después del Corte (0 meses)	0,114	0,105
	Tiempo Intermedio (3 meses)	0,131	
	Antes del Corte - Cierre de calles (6 meses)	0,064	
Plantilla		0,975	

En la Tabla 3-10, se observa una aproximación del comportamiento del corte por entresaque, con respecto al corte por parejo, observando que se estima que las pérdidas de suelo, o la erosión potencial es menor en este corte, al tener un factor C 2,2 veces menor, que el factor C estimado para el corte por parejo. Esta tendencia también se observa en los momentos de medición, dónde en general se observa un comportamiento en el que se obtienen factores C mayores en corte por parejo que en corte por entresaque, sin embargo, no se observa una clara variación del factor C con respecto al grado de desarrollo del cultivo, pero si se observa que la diferencia entre factores C estimados para entresaque y parejo, se reduce a medida que se tiene un mayor grado de desarrollo del cultivo. Por su parte el caso de la plantilla, al comportarse como un testigo de un suelo sin cubierta vegetal y recién sembrado tiene una clara tendencia a presentar pérdidas de suelo superiores a cualquiera de los dos sistemas de corte, con un factor C 9 veces mayor al valor medio obtenido para el corte por parejo y casi 20 veces mayor al valor medio obtenido para entresaque.

Es importante tener en cuenta que el factor C se define como el producto de tres factores, el primero correspondiente a la cubierta de resguardo o atenuación, que se refiere a la protección brindada por ramas y hojas que no están en contacto directo con el suelo, el segundo asociado a los efectos de una cubierta de hojarasca o vegetación densa en crecimiento, en contacto directo con la superficie del suelo y un tercer factor asociado a efectos residuales del uso de la tierra (Gómez, 2002). Al comparar estos valores con otros factores C determinados para diferentes cultivos, se observa que el corte por parejo es similar al determinado para maíz con cobertura (C estimado de 0,1) o soja (C estimado de

0,17) (Gvozdenovich *et al.*, 2017). Lianes *et al.*, (2009), presentan valores de C que van desde 0,003 para bosque natural, 0,012 para pastos de corte, y 0,26 a 0,36 para cultivos de papa con distintas rotaciones, y los comparan con valores de C obtenidos en informes técnicos presentados por la FAO para cultivos en Costa Rica, dónde se presenta para caña de azúcar un C igual a 0,263.

3.3.5 Determinación de erosión potencial USLE

Finalmente se utiliza la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, utilizando los factores C estimados previamente para las mediciones directas realizadas en corte por parejo, entresaque y en un lote en plantilla. Además, por medio de las Ecuaciones (3.8) y (3.9), se determina un factor R teniendo en cuenta los datos pluviométricos de una estación cercana al municipio de Quebradanegra, correspondiente a mediciones de precipitación mensual durante 30 años (1980 – 2011). De esta forma se obtiene un R de 6549,17 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹, que de acuerdo con la clasificación presentada por Rivera & Gómez (1991), citada por Lince & Castro (2017), corresponde a un valor de erosividad moderada. Al obtener un R , ya no asociado a un evento específico de precipitación, sino a la precipitación anual de la región de estudio, se obtiene una aproximación a la pérdida de suelo por año, para cada uno de los cortes, obteniendo valores de t ha⁻¹ año⁻¹.

Para entresaque se obtiene que la pérdida de suelo potencial, para un suelo con contenidos de arcilla, limo y arena muy fina de 40,45%, 30,41%, y 7,78% respectivamente, con altos contenidos de materia orgánica, estructura en bloques, permeabilidad lenta a moderada e inclinación de 35%, obtenida por aproximación de la USLE es de 12,35 t ha⁻¹ año⁻¹, para el caso de parejo, en las mismas condiciones descritas anteriormente, se estimó una pérdida de 27,07 t ha⁻¹ año⁻¹. Finalmente, como una aproximación a un testigo, se estimó para plantilla, condición en la cual el suelo se encuentra descubierto una pérdida estimada de 250,36 t ha⁻¹ año⁻¹, observando que en general el cultivo de caña, ofrece una cobertura importante al suelo en términos de protección contra eventos erosivos aun cuando los vertisoles tienden a ser altamente erodables, como reportaron Freebairn y Wockner en 1986 al determinar una pérdida promedio anual por 7 años de un suelo arcilloso, negro, y agrietado bajo cultivo de trigo y barbecho de 61 t ha⁻¹ con pendientes del terreno del 5 al 7%. Para una misma región un suelo arcilloso gris, con pendientes de 4 a

5%, reportaron una pérdida anual promedio durante 7 años de medición de 32 t ha⁻¹ (Freebairn *et al.*, 1996). De acuerdo al criterio de pérdida de suelo de la FAO (1979), citado por González *et al.* (2016), presentado en la Tabla 3-11, las pérdidas de suelo tanto en el corte por entresaque como en el corte por parejo, corresponden a erosión moderada, por su parte el valor estimado para el caso del terreno recién sembrado, se asociaría con una pérdida de suelos muy severa, al ser mayor de 200 t ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 3-11: Rango de erosión potencial. FAO (1979) citado por González *et al.* (2016).

Pérdida de suelo t ha ⁻¹ año ⁻¹	Categoría
0 – 10	Nula a ligera
10 – 50	Moderada
50 – 200	Severa
>200	Muy Severa

4. Conclusiones y recomendaciones

Se observa bajo distintos tipos de análisis, que el factor que presenta una influencia más clara en la pérdida de suelos asociada a eventos de escorrentía superficial es la intensidad de precipitación aplicada con el simulador, al relacionarse directamente con la energía cinética del único agente de erosividad en este tipo de mediciones, siendo el causante del rompimiento de agregados y su transporte. La posibilidad de trabajar dentro de un mismo predio con dos sistemas de corte permitió reducir la variabilidad entre propiedades físicas y químicas del suelo, tal como se esperaba, con el fin de observar con una mayor claridad la interacción entre factores de diseño. Sin embargo, al seleccionar distintos tipos de corte, algunas propiedades físicas como la porosidad total, el diámetro medio ponderado y el agua aprovechable, al estar relacionadas con el manejo y los niveles de degradación del suelo, tuvieron ciertas variaciones entre los distintos lotes seleccionados. El factor pendiente, no presentó evidencias claras de tener un efecto importante en los niveles de pérdida de suelo para estas mediciones. Se observa que, a diferentes niveles de pendiente, la protección dada al suelo por el peso y el porcentaje de cobertura vegetal sobre la superficie, y la protección brindada por el cultivo a medida que se va desarrollando, logran reducir de manera importante el efecto de la pendiente a tal punto que no se observaron diferencias significativas en pérdidas de suelos entre rangos de 10 a 25% y 35 a 50% de inclinación.

Para las condiciones de suelo presentes en el lugar de estudio, se observó que los factores corte y momento de medición, tienen un efecto importante en la pérdida de suelo. Esta tendencia se presentó de forma un poco difusa al momento de determinar relaciones entre los datos promedio de pérdida de suelo, sin embargo, al realizar un primer análisis en parcelas subdivididas, al momento 0 o después del corte en ambos sistemas y compararlo con las mediciones realizadas en plantilla, se observó que luego de la intensidad de precipitación, el corte fue el factor con mayor importancia estadística para explicar la

variación de pérdida de suelos. Al incluir el tiempo y extrapolar el análisis a medidas repetidas, se observó que nuevamente la intensidad de precipitación fue el factor con mayor incidencia en los niveles de erosión, seguido por la interacción corte y momento. Este comportamiento se evidenció en las mediciones hechas en campo, ya que, al tener un mayor grado de desarrollo, en especial en mediciones realizadas antes del corte, ya no eran muy evidente las diferencias en pérdida de suelo, entre ambos sistemas de corte, por lo tanto, la diferenciación no se debe únicamente al sistema de corte, sino al estado de desarrollo del cultivo. Aunque el corte por parejo originalmente se encuentra más desprotegido que el corte por entresaque, a medida que se desarrolla el cultivo, el cubrimiento de las calles, así como el aporte de cobertura vegetal, logran proteger el suelo ante eventos erosivos en ambos sistemas de manejo. Por lo tanto, se infiere que las diferencias presentadas en pérdida de suelos entre ambos sistemas de corte corresponden principalmente a las pérdidas presentadas después del corte, luego a medida que el cultivo se desarrolla no se evidencian claras diferencias de pérdida de suelo entre ambos sistemas de corte.

Por medio del cálculo de los componentes de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos para cada una de las mediciones, se estimó un factor asociado con el cultivo de caña, en sus distintos sistemas de manejo, parejo, entresaque o plantilla. Esta aproximación, evidenció nuevamente que las pérdidas de suelo, bajo corte por parejo son mayores que las que se presentaron en corte por entresaque, debido a la comparación entre indicadores de manejo de la USLE, siendo 2,2 menores las pérdidas potenciales de suelo en el corte por entresaque que en el corte por parejo. Por otra parte, se muestra el potencial del cultivo de caña panelera para proteger el suelo ante eventos erosivos bajo ambos sistemas de corte, al comparar las pérdidas potenciales por año de los sistemas de corte con el caso de plantilla, en el que el suelo no tiene ninguna cobertura vegetal, obteniendo que estas pérdidas son 9 veces menores en el caso del corte por parejo y casi 20 veces menores en el caso del corte por entresaque. Esta protección del suelo se presenta para las características de manejo que se dan en Cundinamarca, en dónde tanto el cultivo por parejo como por entresaque, mantiene constantemente la cobertura de hojarasca, producto de desechos de cosechas anteriores, o de la pérdida de hojas por la planta en el ciclo productivo.

A. Anexo: Registro de calibraciones diseño definitivo

A 2 metros de altura, boquillas número 18 en los extremos, a 12 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	38	34	33
2	25	75	40	37	38
3	25	125	30	23	28
4	25	175	30	32	36
5	75	175	30	24	28
6	75	125	40	50	44
7	75	75	46	46	50
8	75	25	40	24	29
9	125	25	44	35	40
10	125	75	48	39	38
11	125	125	54	47	48
12	125	175	46	41	35
13	175	175	44	45	45
14	175	125	50	62	66
15	175	75	50	49	50
16	175	25	48	44	42
17	225	25	40	42	54
18	225	75	48	59	56
19	225	125	26	41	39
20	225	175	40	41	40
21	275	175	32	24	25
22	275	125	44	30	29
23	275	75	44	44	44
24	275	25	36	37	39
25	325	25	30	25	27
26	325	75	35	48	48
27	325	125	40	56	55
28	325	175	24	29	22
29	375	175	40	39	36
30	375	125	24	39	39
31	375	75	22	39	41
32	375	25	34	33	32
Media			0,24	0,53	0,30
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		0,40	1,10	0,60
Mínimo			0,10	0,10	0,10
			Intensidad 76,28 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 82,26%		

A 2 metros de altura, boquillas número 18 en los extremos, a 15 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	28	28	28
2	25	75	30	28	24
3	25	125	26	26	24
4	25	175	28	30	30
5	75	175	28	24	23
6	75	125	40	38	43
7	75	75	44	45	46
8	75	25	32	32	29
9	125	25	38	46	42
10	125	75	34	36	34
11	125	125	37	50	40
12	125	175	33	36	40
13	175	175	35	37	37
14	175	125	49	54	56
15	175	75	50	50	50
16	175	25	36	41	38
17	225	25	40	52	45
18	225	75	50	52	53
19	225	125	52	48	50
20	225	175	38	38	38
21	275	175	22	24	20
22	275	125	26	38	26
23	275	75	40	32	44
24	275	25	44	40	40
25	325	25	44	30	38
26	325	75	38	50	44
27	325	125	30	37	40
28	325	175	26	24	26
29	375	175	22	30	30
30	375	125	34	32	38
31	375	75	35	42	40
32	375	25	36	36	34
Media			1,05	0,65	1,00
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		1,60	1,10	1,50
Mínimo			0,30	0,10	0,30
			Intensidad 71,63 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 81,95%		

A 2 metros de altura, boquillas número 18 en los extremos, a 18 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	20	20	20
2	25	75	32	32	32
3	25	125	29	29	29
4	25	175	27	27	27
5	75	175	40	40	40
6	75	125	40	40	40
7	75	75	31	31	31
8	75	25	30	30	30
9	125	25	34	34	34
10	125	75	36	36	36
11	125	125	36	36	36
12	125	175	35	35	35
13	175	175	28	28	28
14	175	125	38	38	38
15	175	75	38	38	38
16	175	25	20	20	20
17	225	25	40	40	40
18	225	75	38	38	38
19	225	125	40	40	40
20	225	175	38	38	38
21	275	175	36	36	36
22	275	125	48	48	48
23	275	75	38	38	38
24	275	25	34	34	34
25	325	25	34	34	34
26	325	75	40	40	40
27	325	125	32	32	32
28	325	175	36	36	36
29	375	175	31	31	31
30	375	125	33	33	33
31	375	75	42	42	42
32	375	25	24	24	24
Media			0,89	1,16	0,22
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		1,30	1,70	0,70
Mínimo			0,10	0,80	0,10
			Intensidad 65,42 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 87,63%		

A 2 metros de altura, boquillas número 14 en los extremos, a 12 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	15	14	14
2	25	75	17	16	16
3	25	125	14	16	15
4	25	175	16	13	15
5	75	175	16	17	18
6	75	125	19	18	18
7	75	75	19	22	16
8	75	25	16	20	16
9	125	25	18	36	22
10	125	75	20	28	18
11	125	125	22	20	22
12	125	175	20	22	20
13	175	175	20	18	17
14	175	125	17	22	25
15	175	75	28	24	23
16	175	25	23	36	18
17	225	25	18	38	24
18	225	75	20	32	28
19	225	125	28	26	28
20	225	175	28	20	22
21	275	175	24	20	24
22	275	125	23	22	23
23	275	75	16	24	23
24	275	25	34	19	18
25	325	25	18	20	18
26	325	75	22	20	20
27	325	125	21	22	22
28	325	175	21	20	20
29	375	175	22	20	18
30	375	125	17	17	17
31	375	75	22	21	21
32	375	25	20	20	19
Media			0,84	1,16	1,19
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		2,10	1,80	1,00
Mínimo			0,10	0,30	0,20
			Intensidad 40,36 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 86,42%		

A 2 metros de altura, boquillas número 14 en los extremos, a 15 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	14	14	14
2	25	75	16	15	15
3	25	125	16	16	14
4	25	175	16	14	12
5	75	175	18	14	16
6	75	125	18	18	16
7	75	75	20	14	16
8	75	25	18	19	16
9	125	25	19	24	16
10	125	75	22	20	16
11	125	125	23	16	16
12	125	175	17	18	18
13	175	175	27	21	20
14	175	125	25	27	24
15	175	75	18	28	22
16	175	25	16	22	20
17	225	25	34	26	24
18	225	75	46	29	30
19	225	125	26	34	34
20	225	175	21	29	29
21	275	175	24	23	24
22	275	125	24	26	24
23	275	75	24	24	22
24	275	25	19	24	20
25	325	25	19	24	20
26	325	75	20	24	18
27	325	125	21	22	20
28	325	175	23	22	22
29	375	175	18	16	16
30	375	125	18	18	16
31	375	75	18	20	16
32	375	25	17	20	18
A	-25	75	-	15	16
B	-25	125	-	24	22
Media			0,53	0,59	1,25
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		1,50	1,30	2,40
Mínimo			0,10	0,10	0,20
			Intensidad 39,97 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 81,88 %		

A 2 metros de altura, boquillas número 14 en los extremos, a 18 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	14	19	16
2	25	75	14	12	15
3	25	125	14	12	14
4	25	175	10	12	16
5	75	175	16	12	17
6	75	125	20	16	22
7	75	75	16	24	21
8	75	25	26	23	20
9	125	25	18	22	20
10	125	75	16	18	20
11	125	125	18	17	19
12	125	175	16	16	18
13	175	175	22	20	28
14	175	125	22	24	26
15	175	75	21	23	27
16	175	25	17	23	26
17	225	25	29	22	27
18	225	75	23	30	28
19	225	125	36	28	30
20	225	175	31	26	22
21	275	175	20	18	18
22	275	125	17	20	18
23	275	75	23	16	17
24	275	25	20	17	17
25	325	25	17	17	17
26	325	75	19	17	14
27	325	125	18	17	14
28	325	175	19	17	15
29	375	175	17	16	16
30	375	125	16	16	16
31	375	75	18	16	16
32	375	25	18	15	17
A	-25	75	14	8	12
B	-25	125	12	13	10
Media			1,19	0,28	0,34
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		2,10	0,50	0,70
Mínimo			0,10	0,10	0,10
			Intensidad 36,52 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 81,02 %		

A 3 metros de altura, boquillas número 21 ½ en los extremos, a 17 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	42	44	20
2	25	75	40	38	14
3	25	125	40	28	16
4	25	175	40	34	24
5	75	175	30	44	30
6	75	125	44	47	23
7	75	75	67	52	38
8	75	25	40	34	31
9	125	25	50	48	32
10	125	75	52	52	34
11	125	125	55	50	31
12	125	175	30	50	25
13	175	175	64	82	24
14	175	125	62	54	34
15	175	75	51	48	28
16	175	25	60	70	28
17	225	25	32	48	26
18	225	75	48	36	28
19	225	125	48	48	22
20	225	175	46	44	22
21	275	175	38	46	29
22	275	125	60	56	28
23	275	75	50	50	27
24	275	25	27	24	24
25	325	25	30	22	23
26	325	75	60	40	30
27	325	125	64	70	33
28	325	175	35	38	32
29	375	175	44	40	29
30	375	125	46	38	30
31	375	75	48	50	25
32	375	25	38	46	41
A	-25	75	-	-	30
B	-25	125	-	-	24
Media			0,42	1,05	1,07
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		1,00	2,00	1,50
Mínimo			0,00	0,60	0,60
			Intensidad 88,16 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 84,08 %		

A 3 metros de altura, boquillas número 18 en los extremos, a 11 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	36	48	16
2	25	75	30	28	13
3	25	125	25	32	8
4	25	175	16	24	16
5	75	175	40	44	22
6	75	125	32	50	17
7	75	75	34	38	22
8	75	25	38	40	20
9	125	25	26	26	20
10	125	75	34	36	20
11	125	125	35	37	21
12	125	175	44	38	17
13	175	175	42	42	19
14	175	125	52	46	19
15	175	75	35	46	16
16	175	25	23	18	33
17	225	25	22	32	18
18	225	75	40	38	17
19	225	125	48	54	15
20	225	175	34	41	20
21	275	175	40	40	23
22	275	125	48	58	22
23	275	75	34	38	20
24	275	25	28	36	18
25	325	25	30	42	19
26	325	75	24	26	21
27	325	125	40	30	16
28	325	175	46	48	30
29	375	175	24	22	19
30	375	125	36	38	22
31	375	75	22	25	23
32	375	25	34	36	31
A	-25	75	-	-	23
B	-25	125	-	-	19
Media			1,12	1,15	0,54
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		1,90	1,90	1,00
Mínimo			0,50	0,40	0,00
			Intensidad 66,70 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 81,13 %		

A 3 metros de altura, boquillas número 18 en los extremos, a 14 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	20	24	28
2	25	75	30	39	38
3	25	125	42	40	36
4	25	175	34	28	32
5	75	175	38	38	38
6	75	125	30	34	30
7	75	75	30	24	26
8	75	25	32	40	40
9	125	25	20	22	18
10	125	75	26	28	28
11	125	125	26	28	28
12	125	175	30	28	28
13	175	175	28	26	28
14	175	125	28	30	32
15	175	75	28	28	26
16	175	25	22	24	24
17	225	25	32	38	30
18	225	75	34	36	34
19	225	125	32	30	30
20	225	175	28	32	34
21	275	175	30	30	28
22	275	125	24	26	24
23	275	75	30	26	26
24	275	25	40	40	38
25	325	25	30	30	36
26	325	75	38	44	36
27	325	125	28	30	28
28	325	175	30	26	24
29	375	175	32	32	24
30	375	125	44	34	38
31	375	75	28	32	36
32	375	25	20	16	22
Media			0,60	1,04	0,49
Máximo	Velocidad del viento ($m s^{-1}$)		0,80	1,50	1,00
Mínimo			0,20	0,70	0,10
			Intensidad $58,97 mm h^{-1}$		
			Coeficiente de Uniformidad 85,83%		

A 3 metros de altura, boquillas número 18 en los extremos, a 17 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	25	25	28
2	25	75	25	34	33
3	25	125	27	32	27
4	25	175	22	22	20
5	75	175	27	30	23
6	75	125	22	32	40
7	75	75	21	32	33
8	75	25	26	30	26
9	125	25	22	26	25
10	125	75	21	23	24
11	125	125	26	25	28
12	125	175	28	36	32
13	175	175	32	27	31
14	175	125	35	41	32
15	175	75	32	29	28
16	175	25	23	24	24
17	225	25	24	24	25
18	225	75	28	31	34
19	225	125	34	35	37
20	225	175	27	30	32
21	275	175	17	20	18
22	275	125	28	32	28
23	275	75	30	29	30
24	275	25	22	24	28
25	325	25	28	30	34
26	325	75	28	32	34
27	325	125	25	28	30
28	325	175	22	28	22
29	375	175	28	34	26
30	375	125	27	35	36
31	375	75	28	40	38
32	375	25	30	34	36
Media			0,52	0,73	-
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		1,00	1,00	-
Mínimo			0,20	0,20	-
			Intensidad 55,35 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 88,34 %		

A 3 metros de altura, boquillas número 14 en los extremos, a 11 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	14	14	14
2	25	75	16	16	16
3	25	125	18	18	18
4	25	175	20	20	20
5	75	175	18	18	18
6	75	125	18	18	18
7	75	75	16	16	16
8	75	25	22	22	22
9	125	25	16	16	16
10	125	75	14	14	14
11	125	125	16	16	16
12	125	175	21	21	21
13	175	175	22	22	22
14	175	125	21	21	21
15	175	75	17	17	17
16	175	25	20	20	20
17	225	25	18	18	18
18	225	75	20	20	20
19	225	125	22	22	22
20	225	175	22	22	22
21	275	175	18	18	18
22	275	125	20	20	20
23	275	75	18	18	18
24	275	25	22	22	22
25	325	25	23	23	23
26	325	75	18	18	18
27	325	125	16	16	16
28	325	175	18	18	18
29	375	175	14	14	14
30	375	125	20	20	20
31	375	75	18	18	18
32	375	25	20	20	20
Media			0,72	0,55	1,18
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		1,10	1,10	2,40
Mínimo			0,10	0,00	0,00
			Intensidad 36,47 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 88,33 %		

A 3 metros de altura, boquillas número 14 en los extremos, a 14 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	10	11	12
2	25	75	12	13	14
3	25	125	12	14	14
4	25	175	12	12	10
5	75	175	14	16	14
6	75	125	16	16	16
7	75	75	12	14	16
8	75	25	17	16	16
9	125	25	14	13	14
10	125	75	12	15	14
11	125	125	12	13	12
12	125	175	13	17	14
13	175	175	15	20	18
14	175	125	18	20	20
15	175	75	14	18	16
16	175	25	14	14	14
17	225	25	20	24	20
18	225	75	16	20	12
19	225	125	25	24	24
20	225	175	19	22	24
21	275	175	19	18	20
22	275	125	22	22	22
23	275	75	25	22	22
24	275	25	13	20	18
25	325	25	18	16	20
26	325	75	18	20	20
27	325	125	20	18	20
28	325	175	17	16	16
29	375	175	15	14	18
30	375	125	18	16	16
31	375	75	14	14	16
32	375	25	21	20	21
Media			1,79	0,85	0,79
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		2,50	1,60	1,10
Mínimo			0,90	0,30	0,20
			Intensidad 32,53 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 83,24 %		

A 3 metros de altura, boquillas número 14 en los extremos, a 17 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	10	11	10
2	25	75	12	11	10
3	25	125	12	10	11
4	25	175	12	12	11
5	75	175	15	14	16
6	75	125	15	16	18
7	75	75	16	13	14
8	75	25	15	13	16
9	125	25	15	13	12
10	125	75	15	14	13
11	125	125	14	13	14
12	125	175	12	12	13
13	175	175	14	13	16
14	175	125	18	17	16
15	175	75	18	18	18
16	175	25	15	13	12
17	225	25	21	19	20
18	225	75	19	18	19
19	225	125	32	30	32
20	225	175	23	22	23
21	275	175	19	21	22
22	275	125	22	20	22
23	275	75	22	22	22
24	275	25	20	16	17
25	325	25	19	20	17
26	325	75	19	19	18
27	325	125	18	18	19
28	325	175	20	17	18
29	375	175	16	15	15
30	375	125	16	18	15
31	375	75	16	16	16
32	375	25	17	16	16
Media			0,64	0,88	0,88
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		1,10	2,00	1,80
Mínimo			0,10	0,00	0,10
			Intensidad 32,33 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 81,12 %		

A 4 metros de altura, boquillas número 21 ½ en los extremos, a 15 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	34	24	20
2	25	75	42	24	24
3	25	125	26	18	18
4	25	175	23	10	24
5	75	175	41	31	30
6	75	125	44	31	36
7	75	75	31	21	28
8	75	25	30	23	22
9	125	25	34	22	28
10	125	75	33	28	24
11	125	125	50	30	28
12	125	175	61	32	30
13	175	175	40	24	28
14	175	125	41	26	36
15	175	75	53	22	28
16	175	25	38	29	30
17	225	25	42	22	22
18	225	75	43	23	26
19	225	125	46	27	26
20	225	175	54	25	24
21	275	175	52	23	26
22	275	125	51	27	24
23	275	75	31	18	18
24	275	25	36	28	30
25	325	25	32	33	38
26	325	75	34	31	30
27	325	125	46	26	30
28	325	175	47	32	30
29	375	175	32	30	20
30	375	125	23	36	38
31	375	75	44	42	40
32	375	25	42	22	18
A	-25	75	-	15	22
B	-25	125	-	19	12
Media			1,35	0,98	1,00
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		1,90	1,40	1,40
Mínimo			0,70	0,60	0,50
			Intensidad 78,76 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 80,86 %		

A 4 metros de altura, boquillas número 21 ½ en los extremos, a 18 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	27	24	27
2	25	75	27	31	27
3	25	125	36	41	36
4	25	175	39	36	39
5	75	175	40	36	40
6	75	125	39	49	39
7	75	75	31	35	31
8	75	25	24	29	24
9	125	25	30	28	30
10	125	75	42	42	42
11	125	125	28	32	28
12	125	175	34	31	34
13	175	175	31	24	31
14	175	125	30	32	30
15	175	75	30	27	30
16	175	25	42	27	42
17	225	25	41	30	41
18	225	75	28	27	28
19	225	125	34	35	34
20	225	175	31	29	31
21	275	175	31	34	31
22	275	125	31	31	31
23	275	75	31	31	31
24	275	25	32	33	32
25	325	25	32	52	32
26	325	75	40	41	40
27	325	125	32	34	32
28	325	175	37	38	37
29	375	175	23	36	23
30	375	125	37	42	37
31	375	75	46	48	46
32	375	25	30	33	30
Media			1,37	1,34	66,11
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		1,80	1,70	82,86
Mínimo			0,20	0,80	51,14
			Intensidad 65,34 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 85,59 %		

A 4 metros de altura, boquillas número 18 en los extremos, a 12 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	16	12	26
2	25	75	18	18	25
3	25	125	12	16	27
4	25	175	14	16	28
5	75	175	18	14	32
6	75	125	14	14	30
7	75	75	15	12	18
8	75	25	13	14	26
9	125	25	10	14	24
10	125	75	14	15	28
11	125	125	16	15	21
12	125	175	16	16	31
13	175	175	14	21	26
14	175	125	14	21	22
15	175	75	18	18	28
16	175	25	18	20	32
17	225	25	18	16	20
18	225	75	18	16	24
19	225	125	16	18	30
20	225	175	16	12	33
21	275	175	18	18	31
22	275	125	16	12	28
23	275	75	18	12	22
24	275	25	12	18	24
25	325	25	12	22	24
26	325	75	16	18	28
27	325	125	20	16	24
28	325	175	16	18	34
29	375	175	16	18	20
30	375	125	20	10	34
31	375	75	12	28	24
32	375	25	14	12	26
A	-25	75	28	28	
B	-25	125	16	16	
Media			1,35	0,98	-
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		1,90	1,40	-
Mínimo			0,70	0,60	-
			Intensidad 50,06 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 84,56 %		

A 4 metros de altura, boquillas número 18 en los extremos, a 15 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	28	16	18
2	25	75	32	16	16
3	25	125	34	30	10
4	25	175	28	27	14
5	75	175	34	29	14
6	75	125	22	23	12
7	75	75	22	21	12
8	75	25	23	19	12
9	125	25	30	25	10
10	125	75	14	20	12
11	125	125	20	19	12
12	125	175	24	15	10
13	175	175	18	19	12
14	175	125	22	16	12
15	175	75	18	20	18
16	175	25	18	27	16
17	225	25	24	28	14
18	225	75	24	24	18
19	225	125	22	28	18
20	225	175	40	23	18
21	275	175	20	23	16
22	275	125	20	27	18
23	275	75	22	21	16
24	275	25	24	23	16
25	325	25	22	24	14
26	325	75	16	21	16
27	325	125	19	23	18
28	325	175	21	30	14
29	375	175	29	24	14
30	375	125	24	20	14
31	375	75	22	27	14
32	375	25	16	33	12
A	-25	75	-	-	14
B	-25	125	-	-	16
Media			-	-	-
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		-	-	-
Mínimo			-	-	-
Intensidad 44,76 mm h ⁻¹					
Coeficiente de Uniformidad 83,62 %					

A 4 metros de altura, boquillas número 18 en los extremos, a 18 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	23	20	16
2	25	75	22	18	12
3	25	125	26	14	8
4	25	175	32	20	14
5	75	175	32	16	10
6	75	125	20	16	10
7	75	75	20	18	10
8	75	25	28	20	10
9	125	25	23	21	10
10	125	75	19	20	8
11	125	125	20	20	10
12	125	175	24	19	8
13	175	175	14	23	12
14	175	125	14	24	12
15	175	75	20	26	16
16	175	25	23	22	14
17	225	25	26	23	12
18	225	75	25	31	16
19	225	125	29	28	16
20	225	175	28	24	18
21	275	175	24	22	20
22	275	125	24	25	19
23	275	75	24	23	15
24	275	25	28	17	16
25	325	25	26	20	14
26	325	75	20	18	14
27	325	125	24	18	14
28	325	175	22	23	13
29	375	175	24	19	13
30	375	125	26	14	16
31	375	75	22	20	12
32	375	25	22	22	12
A	-25	75	-	-	12
B	-25	125	-	-	14
Media			-	-	-
Máximo	Velocidad del viento (m s ⁻¹)		-	-	-
Mínimo			-	-	-
Intensidad 41,94 mm h ⁻¹					
Coeficiente de Uniformidad 84,66 %					

A 4 metros de altura, boquillas número 14 en los extremos, a 12 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	15	20	11
2	25	75	18	20	7
3	25	125	14	19	12
4	25	175	18	12	9
5	75	175	16	16	9
6	75	125	16	16	11
7	75	75	12	14	8
8	75	25	14	14	10
9	125	25	14	14	11
10	125	75	13	12	9
11	125	125	13	14	10
12	125	175	16	18	9
13	175	175	16	16	16
14	175	125	16	16	12
15	175	75	18	19	14
16	175	25	18	17	18
17	225	25	18	20	12
18	225	75	20	18	16
19	225	125	21	22	12
20	225	175	17	18	13
21	275	175	16	16	13
22	275	125	21	16	19
23	275	75	22	22	11
24	275	25	18	16	8
25	325	25	18	20	11
26	325	75	18	14	9
27	325	125	14	14	8
28	325	175	20	30	8
29	375	175	34	18	9
30	375	125	16	16	9
31	375	75	16	16	8
32	375	25	16	16	7
A	-25	75	-	-	7
B	-25	125	-	-	6
Media			1,35	0,98	-
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		1,90	1,40	-
Mínimo			0,70	0,60	-
			Intensidad 33,03 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 83,23 %		

A 4 metros de altura, boquillas número 14 en los extremos, a 15 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	10	13	10
2	25	75	12	13	10
3	25	125	16	13	13
4	25	175	12	13	11
5	75	175	24	18	18
6	75	125	14	14	11
7	75	75	10	12	11
8	75	25	12	13	12
9	125	25	14	13	10
10	125	75	12	13	14
11	125	125	12	11	10
12	125	175	16	13	14
13	175	175	16	14	14
14	175	125	12	15	14
15	175	75	13	14	16
16	175	25	15	13	16
17	225	25	21	18	22
18	225	75	22	20	22
19	225	125	22	22	20
20	225	175	20	26	22
21	275	175	20	20	16
22	275	125	18	18	18
23	275	75	18	18	18
24	275	25	18	20	20
25	325	25	16	18	18
26	325	75	16	18	16
27	325	125	20	14	17
28	325	175	20	17	15
29	375	175	16	18	18
30	375	125	16	15	15
31	375	75	16	17	17
32	375	25	16	18	18
Media			-	-	-
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		-	-	-
Mínimo			-	-	-
			Intensidad 30,81 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 81,54 %		

A 4 metros de altura, boquillas número 14 en los extremos, a 18 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	12	9	12
2	25	75	10	9	9
3	25	125	12	9	9
4	25	175	12	10	8
5	75	175	14	10	11
6	75	125	14	10	9
7	75	75	12	11	10
8	75	25	14	13	12
9	125	25	12	14	13
10	125	75	12	11	9
11	125	125	14	12	11
12	125	175	12	11	10
13	175	175	12	12	11
14	175	125	14	15	12
15	175	75	16	14	12
16	175	25	12	14	10
17	225	25	17	18	18
18	225	75	16	15	14
19	225	125	20	20	20
20	225	175	20	21	22
21	275	175	18	16	16
22	275	125	14	17	14
23	275	75	22	14	14
24	275	25	16	15	14
25	325	25	14	15	13
26	325	75	16	12	15
27	325	125	17	18	16
28	325	175	15	16	14
29	375	175	14	10	16
30	375	125	15	18	16
31	375	75	17	14	14
32	375	25	17	13	14
Media			0,97	0,81	1,57
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		2,00	1,70	2,90
Mínimo			0,30	0,20	0,20
			Intensidad 26,82 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 81,96 %		

A 5 metros de altura, boquillas número 21 ½ en los extremos, a 18 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	20	16	20
2	25	75	28	28	30
3	25	125	27	22	38
4	25	175	27	26	32
5	75	175	23	26	36
6	75	125	43	44	40
7	75	75	44	44	32
8	75	25	23	29	10
9	125	25	20	20	36
10	125	75	20	24	24
11	125	125	32	30	32
12	125	175	32	38	34
13	175	175	30	34	38
14	175	125	26	28	30
15	175	75	30	28	32
16	175	25	40	40	53
17	225	25	44	40	42
18	225	75	36	36	34
19	225	125	32	30	36
20	225	175	32	34	38
21	275	175	34	37	40
22	275	125	40	40	42
23	275	75	44	46	46
24	275	25	34	34	36
25	325	25	30	32	30
26	325	75	40	40	40
27	325	125	50	50	42
28	325	175	50	48	44
29	375	175	34	26	28
30	375	125	44	45	34
31	375	75	28	33	34
32	375	25	32	34	38
A	-25	75	30	30	30
B	-25	125	30	30	30
Media			0,68	1,46	0,92
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		1,50	2,50	1,00
Mínimo			0,20	0,80	0,10
			Intensidad 65,72 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 81,45 %		

A 5 metros de altura, boquillas número 21 ½ en los extremos, a 21 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	16	28	20
2	25	75	40	34	30
3	25	125	40	44	42
4	25	175	24	30	25
5	75	175	30	34	37
6	75	125	32	30	32
7	75	75	34	38	36
8	75	25	22	20	18
9	125	25	18	16	16
10	125	75	24	20	24
11	125	125	24	22	22
12	125	175	32	26	28
13	175	175	26	24	24
14	175	125	25	24	22
15	175	75	26	23	26
16	175	25	28	30	26
17	225	25	33	30	30
18	225	75	29	30	30
19	225	125	30	28	29
20	225	175	26	26	26
21	275	175	32	29	29
22	275	125	34	34	34
23	275	75	36	35	32
24	275	25	34	30	30
25	325	25	42	44	43
26	325	75	44	47	42
27	325	125	38	36	37
28	325	175	33	37	35
29	375	175	32	37	34
30	375	125	38	33	33
31	375	75	40	41	40
32	375	25	40	32	37
A	-25	75	22	22	22
B	-25	125	20	16	18
Media			0,72	0,52	0,95
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		1,10	0,80	1,00
Mínimo			0,10	0,10	0,30
			Intensidad 58,70 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 80,64 %		

A 5 metros de altura, boquillas número 18 en los extremos, a 14 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	14	14	13
2	25	75	26	22	28
3	25	125	26	26	26
4	25	175	16	20	18
5	75	175	28	26	24
6	75	125	32	32	28
7	75	75	24	36	33
8	75	25	20	20	20
9	125	25	22	16	14
10	125	75	20	18	17
11	125	125	22	24	19
12	125	175	32	24	28
13	175	175	22	30	24
14	175	125	24	24	21
15	175	75	26	26	22
16	175	25	32	30	30
17	225	25	34	27	26
18	225	75	28	28	26
19	225	125	28	30	22
20	225	175	24	27	25
21	275	175	28	34	30
22	275	125	32	28	30
23	275	75	30	30	30
24	275	25	28	38	26
25	325	25	20	20	26
26	325	75	34	40	41
27	325	125	40	36	34
28	325	175	26	30	28
29	375	175	19	26	20
30	375	125	27	30	28
31	375	75	16	16	20
32	375	25	26	26	28
A	-25	75	17	17	17
B	-25	125	17	17	17
Media			0,34	0,24	0,29
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		0,70	0,60	1,00
Mínimo			0,10	0,10	0,10
			Intensidad 49,25 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 81,88 %		

A 5 metros de altura, boquillas número 18 en los extremos, a 17 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	19	20	22
2	25	75	20	18	16
3	25	125	24	24	23
4	25	175	22	22	21
5	75	175	18	20	18
6	75	125	16	14	18
7	75	75	19	18	14
8	75	25	20	18	17
9	125	25	12	16	13
10	125	75	14	16	16
11	125	125	12	10	10
12	125	175	15	14	16
13	175	175	15	14	12
14	175	125	14	12	13
15	175	75	12	14	13
16	175	25	13	12	14
17	225	25	17	18	14
18	225	75	20	18	16
19	225	125	18	20	20
20	225	175	18	15	14
21	275	175	16	20	18
22	275	125	23	18	20
23	275	75	23	22	20
24	275	25	17	15	16
25	325	25	22	21	20
26	325	75	25	24	22
27	325	125	24	22	23
28	325	175	20	18	17
29	375	175	24	24	22
30	375	125	22	24	20
31	375	75	26	22	24
32	375	25	32	30	28
A	-25	75	22	22	22
B	-25	125	14	10	12
Media			0,89	0,76	1,25
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		2,00	2,70	1,00
Mínimo			0,10	0,10	0,20
			Intensidad 35,74 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 81,26 %		

A 5 metros de altura, boquillas número 18 en los extremos, a 20 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	14	12	18
2	25	75	10	12	10
3	25	125	12	16	16
4	25	175	18	18	16
5	75	175	14	18	14
6	75	125	10	14	12
7	75	75	13	10	10
8	75	25	11	16	12
9	125	25	12	12	10
10	125	75	12	12	11
11	125	125	12	10	11
12	125	175	11	12	10
13	175	175	13	10	14
14	175	125	17	14	14
15	175	75	15	10	14
16	175	25	14	10	12
17	225	25	16	14	17
18	225	75	18	12	15
19	225	125	18	16	14
20	225	175	20	14	18
21	275	175	16	14	16
22	275	125	16	14	18
23	275	75	20	16	16
24	275	25	18	12	17
25	325	25	20	16	19
26	325	75	20	18	22
27	325	125	16	18	18
28	325	175	20	14	19
29	375	175	16	20	18
30	375	125	18	16	18
31	375	75	16	20	18
32	375	25	22	24	20
A	-25	75	16	10	10
B	-25	125	10	10	16
Media			-	-	-
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		-	-	-
Mínimo			-	-	-
			Intensidad 28,96 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 83,69 %		

A 5 metros de altura, boquillas número 14 en los extremos, a 13 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	14	14	16
2	25	75	8	10	12
3	25	125	10	10	10
4	25	175	16	10	12
5	75	175	12	10	12
6	75	125	10	8	8
7	75	75	12	12	12
8	75	25	16	13	14
9	125	25	16	16	16
10	125	75	12	10	12
11	125	125	10	10	10
12	125	175	10	10	10
13	175	175	12	10	10
14	175	125	14	12	20
15	175	75	15	12	14
16	175	25	16	12	13
17	225	25	16	20	17
18	225	75	21	18	24
19	225	125	23	19	10
20	225	175	14	14	16
21	275	175	16	14	16
22	275	125	20	16	16
23	275	75	16	16	16
24	275	25	18	16	12
25	325	25	16	12	18
26	325	75	16	14	14
27	325	125	18	14	16
28	325	175	14	13	14
29	375	175	16	13	14
30	375	125	14	10	12
31	375	75	18	12	14
32	375	25	14	16	14
A	-25	75	8	8	8
B	-25	125	10	8	8
Media			-	-	-
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		-	-	-
Mínimo			-	-	-
			Intensidad 26,33 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 82,24 %		

A 5 metros de altura, boquillas número 14 en los extremos, a 16 psi.

Número	x (cm)	y (cm)	Lectura 1 (ml)	Lectura 2 (ml)	Lectura 3 (ml)
1	25	25	13	9	10
2	25	75	18	14	12
3	25	125	14	13	13
4	25	175	8	10	9
5	75	175	8	8	8
6	75	125	12	8	9
7	75	75	12	12	13
8	75	25	12	12	10
9	125	25	10	13	12
10	125	75	8	10	10
11	125	125	10	8	8
12	125	175	14	13	13
13	175	175	12	8	10
14	175	125	16	12	16
15	175	75	16	16	17
16	175	25	16	16	14
17	225	25	16	16	16
18	225	75	16	16	16
19	225	125	14	19	17
20	225	175	16	19	19
21	275	175	14	14	16
22	275	125	14	14	14
23	275	75	14	16	14
24	275	25	16	14	14
25	325	25	16	14	14
26	325	75	14	12	12
27	325	125	12	14	14
28	325	175	14	14	14
29	375	175	12	14	14
30	375	125	14	14	12
31	375	75	14	12	12
32	375	25	14	14	14
A	-25	75	8	7	6
B	-25	125	7	7	7
Media			-	-	-
Máximo	Velocidad del viento (m s⁻¹)		-	-	-
Mínimo			-	-	-
			Intensidad 24,85 mm h ⁻¹		
			Coeficiente de Uniformidad 82,01 %		

B. Anexo: Datos registrados en campo. Mediciones de erosión hídrica superficial

PSCV: Peso seco de cobertura vegetal – IC: Índice de cobertura – SP: Suelo perdido									
Lote	Parcela	PSCV (kg)	IC (%)	Boquilla	Identificación	Medida (l)	Humedad (%)	SP (g)	Fecha
1	1	62.97	0.54	14	EDF14-1	1.35	33.90	15.34	13/10/2016
1	1	62.97	0.54	18	EDF18-1	5.59	29.58	30.94	14/10/2016
1	1	62.97	0.54	21.5	EDF21-1	32.86	31.23	147.85	14/10/2016
1	2	50.80	0.74	14	EDF14-2	0.06	28.37	0.33	2/11/2016
1	2	50.80	0.74	18	EDF18-2	1.96	27.64	12.01	2/11/2016
1	2	50.80	0.74	21.5	EDF21-2	31.07	29.79	152.25	2/11/2016
1	3	76.99	0.78	21.5	EDF21-3	32.32	29.18	91.79	3/11/2016
1	3	76.99	0.78	14	EDF14-3	0.07	30.36	0.39	3/11/2016
1	3	76.99	0.78	18	EDF18-3	9.50	27.15	73.91	3/11/2016
1	4	61.13	0.77	18	EDF18-4	4.30	30.12	16.58	4/11/2016
1	4	61.13	0.77	14	EDF14-4	1.65	23.51	8.24	4/11/2016
1	4	61.13	0.77	21.5	EDF21-4	1.74	25.84	15.33	4/11/2016
2	1	53.12	0.92	18	PDF18-1	0.08	30.13	0.30	22/11/2016
2	1	53.12	0.92	14	PDF14-1	0.10	27.70	0.60	22/11/2016
2	1	53.12	0.92	21.5	PDF21-1	45.92	27.47	45.92	23/11/2016
2	2	41.31	0.77	21.5	PDF21-2	0.65	25.15	2.15	22/11/2016
2	2	41.31	0.77	18	PDF18-2	0.54	27.96	2.26	23/11/2016
2	2	41.31	0.77	14	PDF14-2	0.45	32.31	0.89	23/11/2016
2	3	40.79	0.86	14	PDF14-3	2.28	30.76	4.75	23/11/2016
2	3	40.79	0.86	21.5	PDF21-3	6.74	33.65	7.41	24/11/2016
2	3	40.79	0.86	18	PDF18-3	45.50	35.19	308.17	24/11/2016
2	4	37.91	0.87	21.5	PDF21-4	87.17	29.10	1697.76	23/11/2016
2	4	37.91	0.87	18	PDF18-4	70.33	32.33	1529.91	24/11/2016
2	4	37.91	0.87	14	PDF14-4	4.35	31.92	9.25	24/11/2016
3	1	55.50	0.87	18	PDS18-1	29.30	25.19	87.98	24/11/2016
3	1	55.50	0.87	21.5	PDS21-1	68.17	27.21	73.56	24/11/2016

PSCV: Peso seco de cobertura vegetal – IC: Índice de cobertura – SP: Suelo perdido									
Lote	Parcela	PSCV	IC	Boquilla	Identificación	Medida	Humedad	SP	Fecha
		(kg)	(%)			(l)	(%)	(g)	
3	3	64.43	0.88	18	PDS18-3	83.34	34.55	134.15	25/11/2016
3	1	55.50	0.87	14	PDS14-1	22.30	30.86	14.47	25/11/2016
3	2	40.75	0.86	18	PDS18-2	51.22	34.73	151.51	25/11/2016
3	2	40.75	0.86	21.5	PDS21-2	130.64	37.47	290.30	25/11/2016
3	2	40.75	0.86	14	PDS14-2	40.66	35.21	37.49	25/11/2016
3	3	64.43	0.88	14	PDS14-3	17.34	34.66	21.16	25/11/2016
3	3	64.43	0.88	21.5	PDS21-3	125.57	39.98	156.11	25/11/2016
1	2	49.33	0.89	21.5	EIF21-2	24.90	29.70	464.85	14/12/2016
1	2	49.33	0.89	14	EIF14-2	14.65	28.99	102.42	14/12/2016
1	2	49.33	0.89	18	EIF18-2	33.75	21.62	255.10	14/12/2016
1	3	87.2	0.43	14	EIF14-3	0.25	23.29	1.94	15/12/2016
1	3	87.2	0.43	21.5	EIF21-3	3.95	26.69	64.20	15/12/2016
1	3	87.2	0.43	18	EIF18-3	3.60	28.25	31.07	15/12/2016
1	4	95.88	0.8	18	EIF18-4	3.35	25.07	6.71	15/12/2016
1	4	95.88	0.8	14	EIF14-4	12.64	32.35	20.03	15/12/2016
1	4	95.88	0.8	21.5	EIF21-4	19.60	22.98	82.58	15/12/2016
1	1	53.6	0.71	18	EIS18-1	0.30	27.29	1.61	16/12/2016
1	1	53.6	0.71	21.5	EIS21-1	1.10	32.03	5.78	16/12/2016
1	1	53.6	0.71	14	EIS14-1	0.50	33.41	2.71	16/12/2016
5	1	0	0.14	21.5	PPF21-1	60.76	21.20	1162.87	24/01/2017
5	1	0	0.14	14	PPF14-1	5.55	25.15	44.84	24/01/2017
5	1	0	0.14	18	PPF18-1	34.83	23.36	466.77	24/01/2017
5	2	0	0.07	18	PPF18-2	80.40	27.27	2720.74	24/01/2017
5	2	0	0.07	21.5	PPF21-2	101.85	27.07	2554.51	24/01/2017
5	2	0	0.07	14	PPF14-2	28.06	32.50	338.95	24/01/2017
5	3	0	0.2	18	PPF18-3	74.72	15.05	756.21	24/01/2017
5	3	0	0.2	21.5	PPF21-3	88.64	25.02	2176.92	25/01/2017
5	3	0	0.2	14	PPF14-3	37.01	22.86	271.62	25/01/2017
5	4	0	0.14	14	PPF14-4	27.53	20.82	332.74	25/01/2017
5	4	0	0.14	21.5	PPF21-4	40.54	22.77	1383.11	25/01/2017
5	4	0	0.14	18	PPF18-4	75.88	22.44	1551.02	25/01/2017
6	1	0	0.35	14	PPS14-1	3.82	12.64	22.91	25/01/2017
6	1	0	0.35	21.5	PPS21-1	29.83	19.64	263.67	25/01/2017
6	1	0	0.35	18	PPS18-1	29.30	19.34	283.58	26/01/2017
6	2	0	0.23	21.5	PPS21-2	63.51	28.66	1002.21	26/01/2017
6	3	0	0.19	18	PPS18-3	99.34	14.62	1255.63	26/01/2017
6	3	0	0.19	21.5	PPS21-3	103.92	20.87	5042.19	26/01/2017
6	3	0	0.19	14	PPS14-3	47.62	18.04	395.21	27/01/2017
6	2	0	0.23	18	PPS18-2	7.86	14.03	170.77	25/01/2017

PSCV: Peso seco de cobertura vegetal – IC: Índice de cobertura – SP: Suelo perdido									
Lote	Parcela	PSCV (kg)	IC (%)	Boquilla	Identificación	Medida (l)	Humedad (%)	SP (g)	Fecha
6	4	0	0.19	14	PPS14-4	19.73	24.47	361.77	26/01/2017
6	4	0	0.19	18	PPS18-4	62.10	22.82	1282.97	27/01/2017
6	4	0	0.19	21.5	PPS21-4	114.40	28.05	2821.01	27/01/2017
4	1	42.01	0.89	21.5	EDS21-1	2.05	32.59	46.82	16/02/2017
4	1	42.01	0.89	18	EDS18-1	1.30	32.82	19.60	16/02/2017
4	1	42.01	0.89	14	EDS14-1	0.36	34.69	2.62	16/02/2017
4	2	48.79	0.85	14	EDS14-2	0.53	41.23	10.02	16/02/2017
4	2	48.79	0.85	18	EDS18-2	0.88	32.15	9.38	16/02/2017
4	2	48.79	0.85	21.5	EDS21-2	4.46	31.40	75.91	17/02/2017
4	3	42.16	0.83	21.5	EDS21-3	0.60	27.15	3.36	17/02/2017
4	3	42.16	0.83	18	EDS18-3	0.95	41.14	6.44	17/02/2017
4	3	42.16	0.83	14	EDS14-3	0.85	35.02	3.89	17/02/2017
4	4	42.89	0.78	21.5	EDS21-4	12.82	27.14	24.35	17/02/2017
4	4	42.89	0.78	18	EDS18-4	37.01	32.16	89.55	17/02/2017
4	4	42.89	0.78	14	EDS14-4	11.31	35.02	26.93	17/02/2017
2	1	68.33	0.88	18	PIF18-1	42.87	29.20	117.47	7/03/2017
2	1	68.33	0.88	14	PIF14-1	8.35	37.56	19.04	8/03/2017
2	1	68.33	0.88	21.5	PIF21-1	62.28	32.13	276.52	8/03/2017
2	2	149.57	0.83	18	PIF18-2	25.08	31.71	15.05	8/03/2017
2	2	149.57	0.83	14	PIF14-2	1.60	30.12	1.73	8/03/2017
2	2	149.57	0.83	21.5	PIF21-2	58.64	44.62	53.95	8/03/2017
2	3	91.43	0.89	21.5	PIF21-3	26.30	44.34	41.03	8/03/2017
2	3	91.43	0.89	14	PIF14-3	0.20	25.63	0.49	9/03/2017
2	3	91.43	0.89	18	PIF18-3	8.35	27.72	10.52	9/03/2017
2	4	72.48	0.84	21.5	PIF21-4	69.40	34.24	64.88	9/03/2017
2	4	72.48	0.84	14	PIF14-4	15.15	34.43	10.60	9/03/2017
2	4	72.48	0.84	18	PIF18-4	67.79	34.16	55.59	9/03/2017
3	1	61.33	0.79	18	PIS18-1	9.99	31.24	44.57	9/03/2017
3	2	74.7	0.82	18	PIS18-2	8.52	37.81	2.21	10/03/2017
3	1	61.33	0.79	21.5	PIS21-1	59.06	30.97	60.24	10/03/2017
3	2	74.7	0.82	21.5	PIS21-2	68.12	41.31	16.35	10/03/2017
3	3	107.85	0.8	14	PIS14-3	16.83	33.38	11.45	10/03/2017
3	3	107.85	0.8	18	PIS18-3	54.61	32.67	37.13	11/03/2017
3	3	107.85	0.8	21.5	PIS21-3	44.86	35.60	12.56	11/03/2017
3	4	154.8	0.9	14	PIS14-4	11.64	38.21	2.79	11/03/2017
3	4	154.8	0.9	18	PIS18-4	60.33	40.22	19.31	11/03/2017
3	4	154.8	0.9	21.5	PIS21-4	81.60	42.73	24.48	11/03/2017
1	1	39.8	0.51	21.5	EAF21-1	13.81	33.54	34.52	5/04/2017

PSCV: Peso seco de cobertura vegetal – IC: Índice de cobertura – SP: Suelo perdido									
Lote	Parcela	PSCV	IC	Boquilla	Identificación	Medida	Humedad	SP	Fecha
		(kg)	(%)			(l)	(%)	(g)	
1	1	39.8	0.51	14	EAF14-1	24.90	40.65	67.74	5/04/2017
3	1	61.33	0.79	14	PIS14-1	19.21	30.69	26.51	9/03/2017
1	1	39.8	0.51	18	EAF18-1	50.58	47.74	159.84	6/04/2017
1	2	79.61	0.73	18	EAF18-2	8.35	27.20	32.57	6/04/2017
1	2	79.61	0.73	14	EAF14-2	3.70	34.15	9.84	6/04/2017
1	2	79.61	0.73	21.5	EAF21-2	1.20	31.14	5.78	6/04/2017
1	3	76.5	0.66	18	EAF18-3	9.50	20.59	41.80	7/04/2017
1	3	76.5	0.66	21.5	EAF21-3	46.98	55.16	213.29	7/04/2017
1	3	76.5	0.66	14	EAF14-3	14.65	39.86	53.89	7/04/2017
1	4	67.83	0.62	14	EAF14-4	0.15	39.67	0.60	3/05/2017
1	4	67.83	0.62	18	EAF18-4	11.64	23.70	48.09	3/05/2017
1	4	67.83	0.62	21.5	EAF21-4	32.68	33.46	146.40	3/05/2017
1	1	76.25	0.75	18	EAS18-1	0.23	39.85	1.06	4/05/2017
1	1	76.25	0.75	21.5	EAS21-1	3.34	34.31	19.49	4/05/2017
1	1	76.25	0.75	14	EAS14-1	0.93	37.38	4.22	4/05/2017
1	2	70.2	0.65	21.5	EAS21-2	0.33	34.71	0.92	4/05/2017
1	2	70.2	0.65	18	EAS18-2	0.10	35.83	0.35	4/05/2017
1	2	70.2	0.65	14	EAS14-2	0.08	60.28	0.28	4/05/2017
1	3	147.11	0.47	14	EAS14-3	0.55	39.03	1.46	4/05/2017
1	3	147.11	0.47	18	EAS18-3	1.65	32.24	6.01	4/05/2017
1	3	147.11	0.47	21.5	EAS21-3	3.98	33.76	24.11	5/05/2017
1	4	73.53	0.67	21.5	EAS21-4	0.93	41.61	7.16	5/05/2017
1	4	73.53	0.67	18	EAS18-4	0.10	37.37	0.35	5/05/2017
1	4	73.53	0.67	14	EAS14-4	0.33	34.02	0.75	5/05/2017
4	2	88	0.79	14	EIS14-2	0.23	39.06	0.58	7/06/2017
4	2	88	0.79	21.5	EIS21-2	0.18	33.03	2.04	7/06/2017
4	3	88.75	0.9	18	EIS18-3	22.30	32.45	51.30	7/06/2017
4	3	88.75	0.9	14	EIS14-3	2.70	32.56	7.23	7/06/2017
4	4	108.75	0.85	18	EIS18-4	0.15	27.92	0.43	8/06/2017
4	4	108.75	0.85	21.5	EIS21-4	41.03	28.41	115.70	8/06/2017
4	4	108.75	0.85	14	EIS14-4	1.75	30.97	6.20	8/06/2017
2	1	31.62	0.7	21.5	PAF21-1	0.08	22.02	0.30	18/07/2017
2	1	31.62	0.7	18	PAF18-1	0.15	23.97	0.96	18/07/2017
2	1	31.62	0.7	14	PAF14-1	0.09	25.31	0.51	18/07/2017
2	2	56.69	0.87	14	PAF14-2	0.25	25.72	1.36	18/07/2017
2	2	56.69	0.87	21.5	PAF21-2	0.13	34.77	0.60	19/07/2017
2	2	56.69	0.87	18	PAF18-2	0.40	30.73	1.26	19/07/2017
2	3	47.35	0.93	14	PAF14-3	0.40	21.85	1.28	19/07/2017
2	3	47.35	0.93	21.5	PAF21-3	0.17	27.34	0.98	19/07/2017

PSCV: Peso seco de cobertura vegetal – IC: Índice de cobertura – SP: Suelo perdido									
Lote	Parcela	PSCV (kg)	IC (%)	Boquilla	Identificación	Medida (l)	Humedad (%)	SP (g)	Fecha
2	3	47.35	0.93	18	PAF18-3	16.67	31.96	88.66	19/07/2017
4	2	88	0.79	18	EIS18-2	0.25	30.59	1.65	6/06/2017
2	4	84.6	0.83	18	PAF18-4	0.33	52.92	0.93	19/07/2017
2	4	84.6	0.83	14	PAF14-4	1.25	29.29	3.10	19/07/2017
2	4	84.6	0.83	21.5	PAF21-4	9.34	33.93	25.95	20/07/2017
3	1	139.01	0.7	21.5	PAS21-1	9.34	27.21	24.46	20/07/2017
3	1	139.01	0.7	14	PAS14-1	7.70	35.80	20.63	20/07/2017
3	1	139.01	0.7	18	PAS18-1	42.87	27.51	102.04	20/07/2017
3	2	59.02	0.88	21.5	PAS21-2	0.75	34.25	3.20	20/07/2017
3	2	59.02	0.88	14	PAS14-2	0.09	31.27	0.64	21/07/2017
3	2	59.02	0.88	18	PAS18-2	0.21	14.43	1.57	21/07/2017
3	3	73.29	0.82	18	PAS18-3	32.13	34.47	124.66	21/07/2017
3	3	73.29	0.82	21.5	PAS21-3	73.87	36.78	277.76	21/07/2017
3	3	73.29	0.82	14	PAS14-3	23.51	33.49	69.60	21/07/2017
3	4	127.3	0.85	14	PAS14-4	4.94	27.15	34.30	21/07/2017
3	4	127.3	0.85	18	PAS18-4	18.87	29.62	53.92	21/07/2017
3	4	127.3	0.85	21.5	PAS21-4	35.38	31.45	109.66	21/07/2017

Bibliografía

Amézquita, M., & Muñoz, J. 1978. Manual estadístico para la experimentación en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Departamento de biometría, CIAT.

Aoki, A.M., y Sereno, R. 2006. Evaluación de la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante un microsimulador de lluvias. *Agriscientia*. 23:23-31 pp.

Arnaez, J., Lasanta, P., Ruiz, F., Ortigosa, L. 2007. Factors affecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean vineyards. *Soil Tillage Res.* 93:324-334 pp.

Arnoulds, H. 1977. Predicting soil losses due to sheet and rill erosion. En: *FAO Conservation Guide No. 1: Guidelines for watershed management*. Pag. 99-123.

Bateman A. 2007. *Hidrología básica y aplicada*. Barcelona.

Benmansour, M., Mabit, L., Nouira, A., Moussadek, R., Bouksirate, H., Duchemin, M., & Benkdad, A. 2013. Assessment of soil erosion and deposition rates in a Moroccan agricultural field using fallout ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pbex. *Journal of Environmental Radioactivity*, 115, 97–106. <http://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.07.013>

Brandt C. 1989. The size distribution of throughfall drops under vegetation canopies. *Catena*, 16, 507-524 pp.

Carvajal, J. 1998. Efectos de tres intensidades de lluvia en el grado de erodabilidad, en el lote #6-3 de la granja modelo del Proyecto Cecil. Municipio de Fussagasugá (Cundinamarca) [dissertation]. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.

Cerda, A. 1999. Simuladores de lluvia y su aplicación a la geomorfología. Estado de la cuestión. *Cuadernos I. Geográfica*, 45-84.

Cheng YB. 1995. Study on soil erodibility of different soils. *Bull Soil Water Conservation*; 15(1):46–50.

CRIE Centro Rural de Información Europea (2005). Página del agua: La erosión. (www.criecv.org/es). Valencia, España

Contreras, E., Portuquez, M., Muñoz, A., Condorhuaman, M. 2015. Inseguridad de la producción agrícola de alimentos por erosión hídrica en la cuenta del Río Siguan – Región Arequipa. *Ciencia e investigación*, Perú. 18(1): 26-32

Correa, G. 2004. Análisis de medidas repetidas. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Dercon, G., Mabit, L., Hancock, G., Nguyen, M. L., Dornhofer, P., Bacchi, O. O. S., Zhang, X. 2012. Fallout radionuclide-based techniques for assessing the impact of soil conservation measures on erosion control and soil quality: an overview of the main lessons learnt under an FAO/IAEA Coordinated Research Project. *Journal of Environmental Radioactivity*, 107, 78–85. <http://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.01.008>

Donald G. 2011. Use of field and laboratory rainfall simulators for assessing the factors of the soil erosion process. Rainfall simulator workshop. 9 pp. Disponible en: https://www.uni-trier.de/fileadmin/fb6/prof/PHY/PDF-Dateien/Publikationen/Proceedings_Rainfall_Simulator_Workshop.pdf .

Esteves, M., Planchon, O., Lapetite, J.M., Silvera, N., Cadet, P., 2000. The 'EMIRE' large rainfall simulator: design and field testing. *Earth Surf. Process. Landf.* 25, 681–690.

Evans, R. 2010. Runoff and soil erosion in arable Britain: changes in perception and policy since 1945. *Environmental Science & Policy*, 13(2), 141–149. <http://doi.org/10.1016/j.envsci.2010.01.001>

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 1997. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. Boletín de Suelos de la FAO. N° 68. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/T0848S/T0848S00.htm> Consulta: Enero 2016.

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2015. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. Capítulo 6 – Simuladores de Lluvia. Departamento de Desarrollo Sostenible. <http://www.fao.org/docrep/t0848s/t0848s08.htm>. (Consulta en marzo de 2015).

Faria C., Moitinho M., Silva F., Lourenço de Freitas, Dallacort R. 2013. Construção e calibração de um simulador de chuva portátil. *Biosfera*. Disponible en: <http://www.conhecer.org.br/enciclop/2013b/CIENCIAS%20AGRARIAS/construcao.pdf>. Consulta en mayo 2016.

Freebairn, D.M., Loch, R.J., & Silbur, D.M. 1996. Soil erosion and soil conservation for vertisols. *Vertisols and technologies for their management*. Development in soil science. Volume 24, chapter 9. ISBN: 978-0-444-88789-4.

García, H., Albarracín, L., Toscano, A., Santana, N., Insuasty, O. 2007. Guía Tecnológica para el Manejo Integral del Sistema Productivo de Caña Panelera. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, CORPOICA. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Bogotá, D.C.

García, F., Terra, J., Sawchik, J. & Pérez, M. 2017. Mejora de las estimaciones con USLE/RUSLE empleando resultados de parcelas de escurrimiento para considerar el efecto del agua del suelo. *Rev. Agrociencia Uruguay*. 21(2):100-104.

Gobin, A., Jones, R., Kirkby, M., Campling, P., Govers, G., Kosmas, C., & Gentile, A. R. 2004. Indicators for pan-European assessment and monitoring of soil erosion by water. *Environmental Science & Policy*, 7(1), 25–38. doi:10.1016/j.envsci.2003.09.004

González, O., Bojórquez, J., Flores, F., Murray, R., González, A. 2016. Riesgo de erosión hídrica y estimación de pérdida de suelo en paisajes geomorfológicos volcánicos en México. *Rev. Cultivos tropicales*. Cuba. 37(2): 45-55

Gómez, L., Lastra, L. 1995. Insectos Asociados con la Caña de Azúcar en Colombia. En: CENICAÑA. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia, Cali, CENICAÑA, 1995. p. 237-263.

Gunn R, Kinzer G. 1949. Terminal velocity of water droplets in stagnant air. *J. Meteorol.*, 6, 243-248 pp.

Gvozdenovich, J., Pérez, M., Novelli, L., Barbagelata, P. 2017. ¿Puede WEPP mejorar la predicción de la erosión de suelos respecto a USLE? *Rev. Ciencia del Suelo*. Argentina. 35(2):259-272.

Hall, M.J. 1970. Use of stain method in determining the drop-size distributions of coarse liquid sprays. *Trans. ASAE*, 41, 33-37 pp.

Ibañez J.J. (2006). La erosión del Suelo: Tipos de Procesos Erosivos. Disponible en: <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2006/03/11/15557> Consulta: marzo 22 de 2010.

IDEA. 2015. Agricultura Sostenible: *La erosión de suelos*. <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/IDEA/2007223> (Consulta en marzo de 2015)

IGAC. Instituto Geográfico " Agustín Codazzi." Subdirección Agrológica, & Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. 2000. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Cundinamarca. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Agrología. Tomo 1 Capítulo 2. 108 pp.

Iserloh, T., Ries, J.B., Arnaez, J., Boix-Fayos, C., Butzen, V., Cerda, A., Echeverria, M.T., Fernandez-Galvez, J., Fister, W., Geissler, C., Gomez, J.A., Gomez-Macpherson, H., Kuhn, N.J., Lazaro, R., Leon, F.J., Martinez-Mena, M., Martinez-Murillo, J.F., Marzen, M., Mingorance, M.D., Ortigosa, L., Peters, P., Reguees, D., Ruiz-Sinoga, J.D., Scholten, T., Seeger, M., Sole-Benet, A., Wengel, R., Wirtz, S. 2013. European small portable rainfall simulators: a comparison of rainfall characteristics. *Catena* 110, 100–112.

Lianes, E., Marchamalo, M., Roldán, M. 2009. Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la Cuenca del Río Birris, Costa Rica. *Rev. Agronomía costarricense*, 33(2): 217-235.

Lince, S., Castro, A. 2015. Erosividad de la lluvia en la región cafetera de Quindío, Colombia. *Rev. Cenicafé*, 66(1):25-31.

Lobo, D., Gabriels, D. 2005. Assessing the rain erosivity and rain distribution in different agro-climatological zones in Venezuela. *Sociedad & Natureza*. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=321328500002>. (Consulta en noviembre de 2017)

Lobo, D. 2015. Factores Asociados a la Degradación de Suelos. Presentación a Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. 27 de mayo de 2015

Lora, M., Camporese, M., Salandín, P. 2016. Design and performance of a nozzle-type rainfall simulator for landslide triggering experiments. *Catena* 140 (2016) 77-89.

Luo DQ, Hou CX, Wei CF. 2003. Study on characteristics of purple soils aggregates erosion-resistant. *J Soil Water Conservation*; 17(2):20–3, 27.

Mabit, L., Meusburger, K., Fulajtar, E., & Alewell, C. 2014. The usefulness of ¹³⁷Cs as a tracer for soil erosion assessment: A critical reply to Parsons and Foster (2011). *Earth-Science Reviews*, 127, 300–307. <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.05.008>

Mancilla, G. 2008. Uso de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) en el campo forestal. Uso y conservación de suelos. Apuntes docentes. Universidad de Chile. Facultad de ciencias forestales. Departamento de silvicultura.

Martínez M., Abadía R., Castillo V. y Albaladejo J. 2001. Diseño experimental mediante lluvia simulada para el estudio de los cambios en la erosión del suelo durante la tormenta. 15 (1-2): 31-43 pp. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/40745165> .

May K.R. 1947. The measurement of airborne droplets by the magnesium oxide method. *Journal of Scientific Instruments* 24, 128-130

Meyer L.D. 1988. Rainfall simulators for soil conservation research. Chapter 4. En: *Soil Erosion Research Methods*. R. Lal (ed.). Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa.

Monroy-Rodríguez, F.L., Álvarez-Herrera, J.G., Alvarado-Sanabria, O.H. 2017. Distribución espacial de algunas propiedades físicas del suelo en un transecto de la granja Tinguavita, Paipa. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 20(1): 91-100.

Montebeller, C. A. Carvalho, D. F. Sobrinho, T. A. Nunes, A. C. S. Rubio, E. 2001. Avaliação Hidráulica de um Simulador de Chuvas Pendular. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol.5, n.1, Campina Grande. 1-5 pp.

Moreno, R., Campos, P., Avendaño, J., Núñez, V., Gil, N.M., Salas, A., Joel, E. 2017. Distribución especial y análisis de la pérdida de suelo en microcuencas de la Sierra de Vaqueros (Salta, Argentina) mediante el uso de un SIG. *Rev. Espacio y Desarrollo. Argentina.* 30(2017): 161-192.

Myers, N. 1987. *Natural Resource Systems and Human Exploitation Systems: Physiobiotic and Ecological Linkages*. World Bank, Washington D.C.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. 2005. *Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua Documentación Teórica. Versión 2005*. Temple, Texas.

Oñate, F., Valdivieso, F. 2004. Metodología para la evaluación del riesgo de erosión hídrica en zonas áridas y su aplicación en el manejo y protección de proyectos hidráulicos. *Revista Electrónica de la REDLACH* no.1, (1): 27-32.

Pabón, J.D. 2011. *El cambio climático en el territorio de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 128pp.

Parsons, A. J., & Foster, I. D. L. 2013. The assumptions of science. *Earth-Science Reviews*, 127, 308–310. <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.05.011>

Pérez R, Jiménez L, García P, Marqués M, Chicharro M, González S, Alegre J, Bienes R. 2003. Calibración de un simulador de lluvia para estudios de degradación del suelo. *Edafología*, 10(2), 247-254.

Ribeiro, B. T., Magalhães, C. A. S., Lima, J. M., Silva, M. L.N. 2007. Calibração e uso de minissimulador de chuva para estudos de erosão e poluição do solo. Universidade Federal de Lavras, Departamento de ciência

do solo. Boletim Técnico N° 77: 1-17 pp. Disponible en: <http://www.ica.ufmg.br/gemisa/attachments/article/48/SimuladordeChuva.pdf>

Ries, J., Marzen, M., Iserloh, T., Fister, W. 2014. Soil Erosion in Mediterranean landscapes – Experimental investigation on crusted surfaces by means of the Portable Wind and Rainfall Simulator. *Journal of Arid Environments* 100 – 101 (2014) 42 – 51.

Rivera, J., Gómez, A. 1991. Erosividad de las lluvias en la zona cafetera central colombiana (Caldas, Quindío y Risaralda). *Cenicafe*, 42(2):37-52.

Rodríguez, G., García, H., Roa, Z., Santacoloma, P. 2004. Producción de panela como estrategia de diversificación en la generación de ingresos en áreas rurales de América Latina. 1era ed. Roma, AGSF Documento de Trabajo (FAO), 98 pp.

Sangüesa, C., Arumí, J., Pizarro, R., y Link, O. 2010. A Rainfall Simulator for the in situ Study of Superficial Runoff and Soil Erosion. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 70(March), 178–182. <http://doi.org/10.4067/S0718-58392010000100019>

Shakesby, R. A. 2011. Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions. *Earth-Science Reviews*, 105(3-4), 71–100. <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.001>

Sheridan, G.J., Noske, P., Lane, P., Sherwin, C. 2008. Using rainfall simulation and site measurements to predict annual interrill erodibility and phosphorus generation rates from unsealed forest roads: Validation against in-situ erosion measurements. *CATENA* 73:49-62 pp.

Shi XM, Shi DM, Wen ZL. 2007. Study on soil anti-erodibility of different land utilization types in purple soil hilly region. *J Soil Water Conservation*; 21(4):63–6.

SIAC. 2015. Degradación del Suelo en Colombia: Factores que Inciden en la Degradación del Suelo. En: <http://siac.gov.co>; consulta: marzo 2016.

Sierra, D. 2010. Relación de la Captura de Carbono en *Saccharum officinarum* con otros factores ambientales para el cultivo de caña panelera. Trabajo de Grado. Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas. Bogotá D.C.

Van Dijk, A. I. J. M., Bruijnzeel, L. A., & Rosewell, C. J. 2002. Rainfall intensity–kinetic energy relationships: a critical literature appraisal. *Journal of Hydrology*, 261(1), 1-23.

- Vargas, F. 2010. Estimación de pérdida de carbono en el suelo por erosión hídrica laminar bajo diferentes escenarios de producción hortícola y ganadera en la subcuenca del río Birris, Costa Rica. Tesis Maestría en manejo gestión integral de cuencas hidrográficas. Turrialba, Costa Rica, Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza CATIE. 169 p.
- Vásquez, A., Vásquez, I., Vásquez, C. & Cañamero, M. 2017. Fundamentos de ingeniería de riegos. Universidad nacional agraria la Molina. Lima, Perú.
- Williams J. 1975. Sediment routing for agricultural watersheds. Water Resour. Bull. 11 (5): 965 – 974.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1958. Rainfall energy and its relation to soil loss. Eos. Trans. AGU 39, 258–291.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses, Agricultural Handbook 537. Science and Education Administration, USDA, Washington, DC (58 pp.).
- WMO. 2009. Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP). Geneva, Switzerland. Chairperson, Publications Board. Disponible en: <http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/publications/PMP/WMO%201045%20en.pdf>
- Yang YS. 1992. A study on the erodibility of purplish soil under different land utilization forms. J Water Soil Conservation; 6(3):52–8.