

Pérdida de suelo por erosión hídrica superficial en caña de azúcar para producción de panela

Soil loss due to superficial water erosion in sugarcane for panela production

José Tauta-Muñoz¹
Jesús Camacho-Tamayo²
Gonzalo Rodríguez-Borray³
Richard Sánchez-Jiménez⁴
Víctor Pulido-Blanco⁵

¹Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA, Colombia).

Correo electrónico: jtauta@agrosavia.co

orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2837-4931>

²Universidad Nacional de Colombia (Colombia). Correo electrónico: jhcamachot@unal.edu.co

orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7066-369X>

³Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA, Colombia).

Correo electrónico: grodriguez@agrosavia.co

orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6261-7418>

⁴Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA, Colombia).

Correo electrónico: rjsanchez@agrosavia.co

orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7452-2843>

⁵Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA, Colombia).

Correo electrónico: vpulido@agrosavia.co

orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1217-6877>

Recibido: 21-03-2023 Aceptado: 25-05-2023

Cómo citar: Tauta-Muñoz, José; Camacho-Tamayo, Jesús; Rodríguez-Borray, Gonzalo; Sánchez-Jiménez, Richard; Pulido-Blanco, Víctor (2023).

Pérdida de suelo por erosión hídrica superficial en caña de azúcar para producción de panela. *Informador Técnico*, 87(2), 107-119.

<https://doi.org/10.23850/22565035.5540>

Resumen

La pérdida de suelo por erosión hídrica superficial es uno de los procesos de degradación que más afecta la calidad física del suelo, y produce más área de degradación a nivel mundial. En este estudio se comparó la pérdida de suelo presente en dos métodos de cosecha de caña de azúcar para la producción de panela, donde se consideraron factores como la intensidad de la precipitación, la pendiente del terreno y el tiempo de crecimiento de la planta. Se observó que el momento justo después de la cosecha es cuando se presentan mayores diferencias entre los métodos de corte, donde la pérdida de suelo es mayor al cosechar por “parejo” que al cosechar por “entresaque”. A medida que se desarrolla el cultivo, esta diferencia disminuye, y la pérdida de suelo se ve más influenciada por la intensidad de la precipitación. Finalmente, se compararon las mediciones realizadas después del corte, con una condición de suelo sin cobertura vegetal, donde se observó que las pérdidas de suelo en cultivos ya establecidos con caña eran notablemente menores con respecto a esta condición. Este estudio establece la importancia del mantillo de hojas como factor protector de suelos en cultivos de caña de azúcar para panela.

Palabras clave: análisis de parcelas subdivididas; simulador de lluvia; métodos de cosecha; medidas repetidas en el tiempo; intensidad de precipitación.

Abstract

Soil loss due to surface water erosion is one of the degradation processes that most affects the physical quality of the soil and produces the largest area of degradation worldwide. This study compared soil loss in two methods of harvesting sugarcane for panela production, considering factors such as rainfall intensity, slope of the land, and time of plant growth. It was observed that the moment just after harvesting is when the greatest differences between cutting methods occur, the loss of soil being greater when harvesting by "parejo" than when harvesting by "entresaque". As the crop develops, this difference decreases, and soil loss is more influenced by the intensity of precipitation. Finally, the measurements made after cutting were compared with a soil condition without vegetation cover, where it was observed that soil losses in crops already established with sugarcane were notably lower concerning this condition. This study establishes the importance of leaf mulch as a soil protection factor in sugarcane crops for panela.

Keywords: harvesting methods; subdivided plot analysis; rainfall simulator; repeated measures over time; rainfall intensity.

1. Introducción

La erosión hídrica superficial es un proceso natural causado por la acción de la lluvia sobre el suelo; sin embargo, puede intensificarse y acelerarse por acciones antropogénicas, convirtiéndola en un fenómeno perjudicial (Dercon *et al.*, 2012; Bandeira *et al.*, 2019; Sousa *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2021). Se considera como el factor de degradación de suelos más importante, al tener como consecuencia, no solo la pérdida del recurso suelo, sino también de agua y nutrientes, causando daños directos e indirectos sobre los cultivos (Portela *et al.*, 2018). Factores físicos como el clima, la topografía, el relieve, la cobertura vegetal, las propiedades del suelo y las prácticas de manejo y conservación, tienen efectos importantes sobre la pérdida del suelo (Bandeira *et al.*, 2019).

El suelo debe cumplir su función para permitir el movimiento vertical del agua de lluvia en su superficie, y resistir la degradación y el transporte de sus partículas por la acción de la precipitación y la escorrentía asociada (Portela *et al.*, 2018). Algunos usos y sistemas de manejo pueden aumentar la pérdida de suelo hasta niveles intolerables, por lo que varias investigaciones han reportado la influencia del sistema de manejo sobre las tasas de erosión (Oliveira *et al.*, 2013). La intensificación del manejo del suelo puede influenciar la calidad de este, lo que afecta la magnitud de la erosión a lo largo del tiempo, especialmente en los cultivos agrícolas (Vanwallegem *et al.*, 2017; Ramos *et al.*, 2019).

Para evaluar la severidad de la erosión hídrica superficial e implementar estrategias que ayuden a la conservación del recurso suelo, y, por lo tanto, a la producción sostenible de cultivos, es importante que la evaluación del fenómeno se realice sobre diversas escalas de tiempo y espacio (Benmansour *et al.*, 2013). En los últimos años, gran parte de los estudios de pérdida de suelo utilizan modelos para identificar tasas de erosión potencial sobre una escala de tiempo (Jaya-Santillán, 2023; Moradpouri *et al.*, 2023; Pacci *et al.*, 2023; Valdivia *et al.*, 2022); sin embargo, las metodologías de medición de campo aún son ampliamente utilizadas en estudios que buscan comparar sistemas de manejo, prácticas de conservación o tipos de cobertura sobre una parcela de medición (Tong *et al.*, 2023; Salcedo *et al.*, 2022; Valdivia *et al.*, 2022), donde el uso de un simulador de lluvia permite recrear distintos eventos controlados en una menor ventana de tiempo, y los equipos construidos con aspersores son los que presentan mayores ventajas en mediciones de este tipo (De Almeida *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2022; Sanchez *et al.*, 2021).

Por ello, las metodologías de medición de pérdida de suelos se deben ajustar a las condiciones reales que se quieren estudiar, dada la variabilidad de los factores físicos en distintas regiones de estudio y la diversidad de prácticas de manejo de los cultivos. Según García *et al.* (2007), en el cultivo de caña de azúcar

para la producción de panela, que es uno de los cultivos agroindustriales más importantes en términos sociales y económicos para Colombia, se usan dos métodos de cosecha específicos, conocidos tradicionalmente como “parejo” y “entresaque”. En el primer método se cortan o cosechan todas las plantas de un mismo lote al mismo tiempo, ya que tienen un crecimiento uniforme de tallos y una madurez homogénea. Por su parte, el corte por “entresaque” corresponde a un sistema en el que no se cosechan todas las plantas de un mismo lote, sino que se recogen solo aquellas que ya alcanzaron su estado de madurez, que no es homogéneo, por lo que, dentro del lote, se encuentran plantas con distintos niveles de desarrollo.

Los antecedentes de estudios de pérdida de suelo para el caso específico de caña de azúcar para producción de panela en Latinoamérica y en zonas andinas son prácticamente nulos; no obstante, en los últimos años, Youlton *et al.* (2016) evaluaron el comportamiento de sedimentos al reemplazar pasturas por caña de azúcar en parcelas experimentales de 100 m² en São Paulo, Brasil, con mediciones realizadas luego de eventos de lluvia natural. En el caso de Brasil, que es el mayor productor de caña de azúcar a nivel mundial, Thomaz *et al.* (2022) recopilaron tasas de erosión de un total de 19 estudios realizados entre los años 2008 a 2019, en cultivos de caña de azúcar, donde nueve correspondieron a mediciones realizadas en campo, cinco de ellos con el uso de simuladores de lluvia y cuatro con eventos de lluvia natural, mientras que los diez estudios restantes establecían las tasas de erosión a partir de modelos como el *Universal Soil Loss Equation* (USLE), *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE) y *Water Erosion Prediction Project* (WEPP). En este último caso, se tiene un antecedente para el caso de caña de azúcar para producción de panela en la misma región de este estudio, publicado por Tauta *et al.* (2018), pero sin el uso de condiciones simuladas controladas y, por ende, de medición directa que permitan discernir el efecto real de los factores.

El objetivo de este estudio fue comparar valores de pérdida de suelo entre los métodos de cosecha de “entresaque” y “parejo”, confrontando estadísticamente el efecto de factores de variación (intensidad de precipitación, momento después del corte, rangos de pendiente) sobre la pérdida de suelo, usando un simulador de lluvias construido específicamente para el control de las variables asociadas.

2. Metodología

El estudio se llevó a cabo en el municipio de Quebradanegra, Cundinamarca, Colombia, finca Villa Macris, ubicada a 5°6'50,53" de latitud Norte, y 74°18'9,28" de longitud Oeste, a una altitud de 932 m s. n. m., temperatura media anual de 21 °C, y precipitación anual de 1628 mm/h. El perfil característico del suelo correspondió a un vertisol *Typic Haplusterts isohipertérmico* muy fino, debido a la alta presencia de arcillas expansibles, 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.

En el perfil se identificaron tres horizontes, el primero con 40 cm de espesor, de color pardo grisáceo muy oscuro y textura arcillosa; un segundo horizonte de los 40 a 85 cm, con continuación de color del primer horizonte y una inclusión de 40 % de color gris muy oscuro, de textura arcillosa; y un tercer horizonte de color gris muy oscuro, con textura arcillosa con fragmentos tipo roca gravilla. Las propiedades hidrofísicas determinadas en los primeros 15 cm de profundidad correspondieron a un diámetro medio ponderado de 2,52 adimensional, obtenido por el método de Yoder; una porosidad total del 52,58 %, obtenida por medio de la relación entre la densidad aparente por el método del anillo del volumen conocido y la densidad real por el método del picnómetro; una infiltración básica de 13,73 mm/h, obtenida por el método de anillos concéntricos en campo; una distribución textural correspondiente a un 39,9 % de arcillas, un 31,18 % de limo y un 28,88 % de arenas, las cuales, a su vez, se distribuyeron en un 7,69 % de arena muy fina, 5,26 % de arena fina, 4,17 % de arena media, 5,28 % de arena gruesa y 5,78 % de arena muy gruesa, determinados por el método de Bouyoucos, en el caso de la distribución textural, y por separación granulométrica en húmedo, en el caso de la distribución de las arenas. Finalmente, la erodabilidad del suelo correspondió a un valor medio de 0,19 Ton*ha*h/ha*MJ*cm, valor obtenido a partir del procedimiento de cálculo expresado por Wischmeier y Smith (1978), para el factor de

erodabilidad de la ecuación universal de pérdida de suelos, el cual se especifica de manera detallada por Tauta *et al.* (2018).

Los factores para la medición de la erosión hídrica superficial en el cultivo de caña de azúcar para panela fueron las combinaciones de sistema de corte (entresaque y parejo) y de variación (precipitación baja, media y alta); momento de corte (0, 3 y 6 meses); y pendiente (suave y fuerte), para un total de 36 combinaciones o unidades experimentales. Aunado a ellos se midió la erosión hídrica superficial en el cultivo de caña de azúcar para panela en plantilla o primera siembra, con los factores de variación pendiente (suave y fuerte) y precipitación (baja, media y alta) en un único momento de corte (cero meses), para un total de 6 unidades experimentales. Se realizaron 4 repeticiones por unidad experimental, para un global de 168 mediciones, 144 de sistema de corte por factor de variación y 24 de primera siembra por pendiente por precipitación a los cero meses (Figura 1). La pendiente suave corresponde a una inclinación del 10 al 25 %, y fuerte del 35 al 50 %. Con el uso del simulador de lluvia, se representaron tres valores de intensidad de precipitación, correspondientes a valores aproximados de 30,81, 44,76 y 78,76 mm/h.

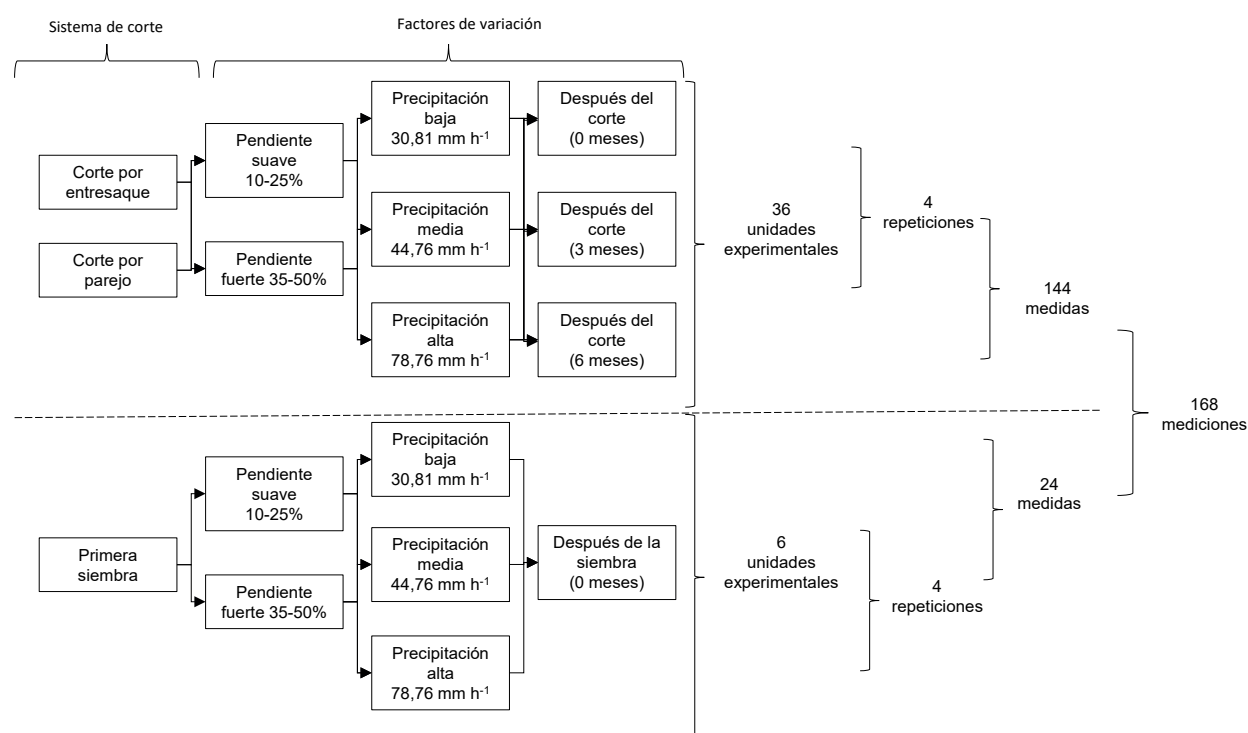


Figura 1. Diseño metodológico de las unidades experimentales evaluadas para la medición de erosión hídrica superficial

Fuente: elaboración propia.

Los valores de pérdida de suelo se compararon por medio de un diseño estadístico en parcelas sub-subdivididas, en el cual el factor principal de variación fue el método de cosecha, el factor secundario fue la selección de alguno de los dos tipos de inclinación de la pendiente y la sub-subdivisión correspondía a la intensidad de precipitación. Se analizaron los datos bajo medidas repetidas en el tiempo, estableciendo como hipótesis que las diferencias en pérdida de suelo se asociaban con las variaciones de pendiente, intensidad de precipitación, métodos de cosecha y momento de medición o desarrollo del cultivo.

Las mediciones se realizaron con el uso de un simulador de lluvia, adaptado para condiciones específicas de pendiente y altura de plantas de caña de azúcar para la producción de panela, en parcelas de 8,91 m² (2 m de ancho x 4,45 m de largo en el sentido de la pendiente). El simulador de lluvia utilizado correspondió a un

equipo diseñado y adaptado para este estudio en específico, conformado por un cuerpo de 5 boquillas que forman dos triángulos equiláteros, con separación entre boquillas de 220 cm, elevadas a 5 m sobre el nivel del suelo. Las boquillas de los extremos correspondían a emisores i-Wob UP3, con un sistema de fácil cambio de boquillas para variaciones en la apertura de salida (Senninger, 2023a). Se utilizaron tres tamaños de apertura de salida distintos para las variaciones de intensidad de precipitación. El emisor central seleccionado correspondía a un mini-Wobbler n° 10, dispuesto de forma invertida (Senninger, 2023b).

La precipitación se aplicó por un tiempo de 15 min, al cabo de cual se determinaba el volumen total de agua de escorrentía, y se obtenía una muestra homogénea de suelo y agua, por cada medición que se procesaba posteriormente en laboratorio mediante filtrado, con el fin de separar el suelo del agua de escorrentía. Luego, se secaba el suelo a 105 °C durante 24 horas y se registraba el peso del suelo seco. Con esta información, se realizó una relación entre la cantidad de suelo perdido y la cantidad de agua de escorrentía, y se expresó esta pérdida de suelo por fracción de área, de acuerdo con el siguiente procedimiento de cálculo (Ecuaciones 1 y 2):

$$ALS = \frac{SD}{SV} * FM \quad (1)$$

$$SL = \frac{ALS}{8,91} * 10 \quad (2)$$

Donde *ALS* es la cantidad de suelo perdido en cada medición (g) (variable respuesta), *SD* es el peso de suelo seco registrado en laboratorio (g), *SV* es el volumen de la muestra de agua de escorrentía procesada en laboratorio (l), *FM* corresponde a la medición del volumen de agua de escorrentía en campo (l), *SL* es la pérdida de suelo expresada en kg/ha, 8,91 corresponde al área de la parcela de escorrentía en m² y 10 es el factor para convertir g en kg y m² en ha.

3. Resultados

De acuerdo con el procedimiento descrito en la metodología, los resultados de medias de pérdida de suelo (PS) por erosión hídrica superficial en el cultivo de caña de azúcar para panela, expresados en kg/ha, se muestran por unidad experimental en la Tabla 1, donde se presentan las 36 mediciones de unidades experimentales, resultado de las combinaciones de los dos sistemas de corte (C), entresaque (E) y parejo (P); los dos rangos de pendiente (RP), suave (S) y fuerte (F); los tres niveles de intensidad de precipitación (I), divididos en precipitación baja (B), media (M) y alta (A); y los tres momentos de medición (Mo), expresados en meses después del corte (0, 3 y 6):

Tabla 1. Valores medios de pérdida de suelo (PS) en kg/ha, de las unidades experimentales resultantes de la combinación de factores

Entresaque						Parejo					
Pendiente suave			Pendiente fuerte			Pendiente suave			Pendiente fuerte		
I	Mo	PS	I	Mo	PS	I	Mo	PS	I	Mo	PS
B	0	12,19	B	0	6,82	B	0	34,28	B	0	4,35
	3	4,69		3	81,94		3	12,64		3	8,94
	6	1,88		6	37,06		6	35,12		6	1,75
M	0	35,07	M	0	37,44	M	0	135,77	M	0	516,45
	3	15,43		3	101,99		3	28,96		3	55,73
	6	2,18		6	79,21		6	79,18		6	25,76
A	0	42,21	A	0	114,26	A	0	198,66	A	0	491,93
	3	38,35		3	258,37		3	31,88		3	122,44
	6	112,23		6	112,23		6	116,46		6	7,81

Fuente: elaboración propia.

Al analizar la interacción entre factores, con el uso del software SAS, del procedimiento de modelos mixtos y análisis de efectos fijos, sin incluir las mediciones del lote de primera siembra, se obtuvieron los resultados de la Tabla 2, donde se observa que los factores con significancia estadística en la pérdida de suelo son principalmente la intensidad de la precipitación, la interacción de factores momento y corte (valor $p < 0,05$), y el momento de medición (valor $p < 0,1$). Las diferencias entre categorías resaltadas en el análisis presentado en la Tabla 2 se identificaron de una manera más precisa por medio de una comparación de medias, la cual se realizó en el mismo procedimiento de modelos mixtos de SAS, por diferencia de medias de mínimos cuadrados, cuyos resultados se presentan en la Tabla 3. En la Tabla 2, los factores intensidad de precipitación y momento se resaltaron como aquellos que tenían una mayor influencia en la pérdida de suelo, de manera individual. En la Tabla 3 se observa que las diferencias estadísticas son significativas al comparar la pérdida de suelo en el valor más bajo de intensidad de precipitación con los otros dos valores, y al comparar los momentos de medición justo después del corte (0 meses) con los seis meses.

Tabla 2. *Análisis de efectos fijos, parcelas sub-subdivididas y medidas repetidas en el tiempo*

Factores	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F
Pendiente	1	11,8	2,1	0,1732
Corte	1	11,8	1,17	0,3019
Corte-pendiente	1	11,8	0,01	0,9072
Intensidad	2	36,7	4,63	0,0161 **
Pendiente-intensidad	2	36,7	1,12	0,3378
Corte-intensidad	2	36,7	1,05	0,3585
Corte-pendiente-intensidad	2	36,7	0,39	0,6771
Momento	2	70,2	2,76	0,0699 *
Momento-pendiente	2	70,2	1,04	0,3582
Momento-corte	2	70,2	3,92	0,0243 **
Momento-corte-pendiente	2	70,2	2,24	0,1143
Momento-intensidad	4	70,2	0,84	0,5016
Momento-pendiente-intensidad	4	70,2	0,42	0,7905
Momento-corte-intensidad	4	70,2	0,76	0,5566
Momento-corte-pendiente-intensidad	4	70,2	0,42	0,7961
Nivel de significancia: * $p < 0,1$; ** $p < 0,05$				

Fuente: elaboración propia.

Al evaluar los datos obtenidos en el momento justo después del corte (0 meses) entre los dos sistemas, y con un suelo sin cobertura vegetal, que es el caso de la primera siembra (P1) incluida en este estudio, por medio de un análisis de varianza de parcelas sub-subdivididas (Tabla 4), se observó que, al incluir la primera siembra (P1), los factores corte e intensidad, así como la interacción de estos dos, son los que presentan mayor representatividad en la pérdida de suelo. Luego se realizó una comparación de medias, con el fin de identificar las variaciones resaltadas en el análisis de varianza, por medio de una prueba Tukey, utilizando el software R 3.4.1, cuyos valores p se presentan en la Tabla 5, donde se estableció que el efecto del sistema de corte está asociado con la diferencia presentada entre los métodos de cosecha y la primera siembra, y no entre ambos métodos de cosecha. La diferencia de medias es estadísticamente significativa también, al comparar las intensidades baja (30,81 mm/h) y alta (78,76 mm/h). En la Figura 2, se presenta la comparación de valores medios de pérdida de suelo entre ambos métodos de cosecha, obtenidos justo después del corte, y los valores medios registrados para el lote sin cobertura vegetal. En la Tabla 6, se presentan los valores medios de pérdida de suelo en el lote de primera siembra.

Tabla 3. Diferencia de medias de mínimos cuadrados según factores y medidas repetidas en el tiempo

Factor	Tratamiento 1		Tratamiento 2		Pr > t
	Tratamiento	Media (kg/ha)	Tratamiento	Media (kg/ha)	
Corte	Entresaque (E)	55,32	Parejo (P)	106,01	0,3019
	Baja (B)	20,14	Media (M)	92,76	0,0538 *
Intensidad	Baja (B)	20,14	Alta (A)	129,09	0,0050 ***
	Media (M)	92,76	Alta (A)	129,09	0,3255
Momento (meses)	0	135,78	3	63,45	0,1230
	0	135,78	6	42,76	0,0258 **
	3	63,45	6	42,76	0,6553
Momento - corte	E - 0	41,33	P - 0	230,24	0,0091 ***
	E - 0	41,33	E - 3	83,46	0,5207
	E - 0	41,33	P - 3	43,43	0,9760
	E - 0	41,33	E - 6	41,18	0,9979
	E - 0	41,33	P - 6	44,35	0,9656
	P - 0	230,24	E - 3	83,46	0,0399 **
	P - 0	230,24	P - 3	43,43	0,0062 ***
	P - 0	230,24	E - 6	41,18	0,0090 ***
	P - 0	230,24	P - 6	44,35	0,0019 ***
	E - 3	83,46	P - 3	43,43	0,5675
	E - 3	83,46	E - 6	41,18	0,5192
	E - 3	83,46	P - 6	44,35	0,5763
	P - 3	43,43	E - 6	41,18	0,9743
	P - 3	43,43	P - 6	44,35	0,9888
	E - 6	41,18	P - 6	44,35	0,9638

Nivel de significancia: * $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Valores p de análisis por parcelas sub-subdivididas, sin interacción de medidas repetidas en el tiempo

Factores	Momento 0 (incluyendo primera siembra)	Momento 0 (sin primera siembra)
Corte	1,7E-07 ****	0,0676 *
Pendiente	0,5677	0,2435
Intensidad	0,0011 ***	0,2373
Corte-pendiente	0,8751	0,3453
Pendiente-intensidad	0,5229	0,6321
Corte-intensidad	0,0029 ***	0,4558
Pendiente-corte-intensidad	0,7034	0,7124

Nivel de significancia: * $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$; **** $p < 0,001$

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Comparación de medias con prueba Tukey, sin interacción de medidas repetidas en el tiempo

Momento	Factor	Tratamiento 1		Tratamiento 2		Pr > t
		T1	PS (kg/ha)	T2	PS (kg/ha)	
0 (con P1)	RP	F	559,13	S	464,28	0,5846
		P	230,24	E	41,33	0,6462
	C	P1	1263,54	E	41,33	1,1E-06 ****
		P1	1263,54	P	230,24	2,8E-05 ****
	I	M	517,71	B	109	0,1388
		A	908,41	B	109	0,0011 ***
0 (sin P1)	RP	F	195,21	S	76,36	0,2635
	C	P	230,24	E	41,33	0,0794 *
		A	211,77	B	14,41	0,4036
	I	M	181,18	B	14,41	0,2846
		A	211,77	M	181,18	0,9691

Nivel de significancia: * p < 0,1; ** p < 0,05; *** p < 0,01; **** p < 0,001

Fuente: elaboración propia.

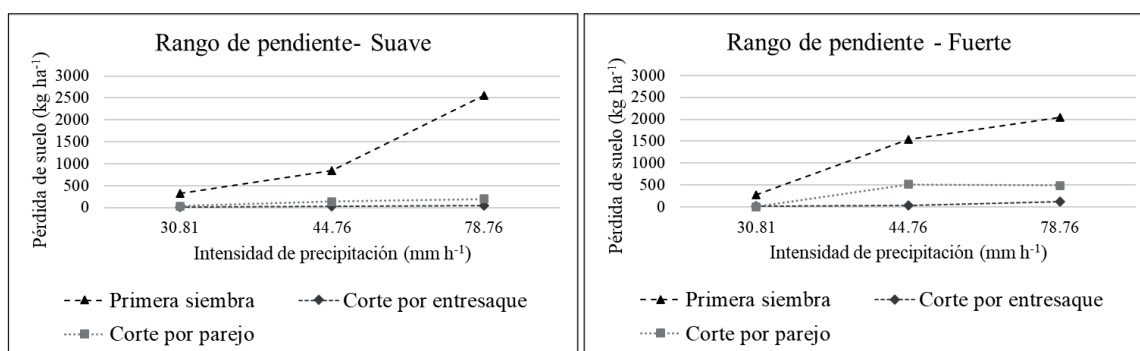


Figura 2. Comparación de valores medios de pérdida de suelo, expresados en kg/ha, para lote sin cobertura vegetal y métodos de cosecha justo después del corte

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Valores medios de pérdida de suelo (PS) en kg/ha, de las unidades experimentales de primera siembra

Pendiente	Intensidad de precipitación	Pérdida de suelo (kg/ha)
Suave	Baja	319,08
	Media	839,77
	Alta	2.561,47
Fuerte	Baja	277,26
	Media	1.541,74
	Alta	2.041,92

Fuente: elaboración propia.

La interacción del método de cosecha con el momento de medición se estableció como uno de los factores de variación de la pérdida de suelo más significativo, de acuerdo con lo presentado en la Tabla 2. Al realizar la comparación de medias, se observa que, en el momento justo después de la cosecha, en el corte por parejo, la pérdida de suelo es significativamente mayor con respecto a las demás combinaciones de corte y momento, comportamiento similar al observado por Oliveira *et al.* (2013), quienes determinaron, en plantaciones de eucalipto que, al iniciar el desarrollo de la planta, el dosel apenas logra cubrir la superficie del suelo, exponiéndolo a una mayor erosión. Vanwallaghem *et al.* (2017) expresaron que el mismo uso de la tierra da como resultado tasas de erosión del suelo significativamente diferentes debido a los efectos del manejo.

La intensidad de precipitación se destacó como uno de los factores de mayor significancia estadística, ya que, como se observa en la Figura 3, presenta una relación directamente proporcional con la pérdida de suelo. Se observa también que la pérdida de suelo va disminuyendo a medida que el cultivo tiene un mayor grado de desarrollo, comportamiento que es notable en el método de cosecha por entresaque con pendiente suave y en el corte por parejo con pendiente fuerte. Oliveira *et al.* (2013) identificaron un comportamiento similar en plantaciones de eucalipto, en el que observaron que las pérdidas de suelo disminuían a medida que crecían las plantas. Silva *et al.* (2021) determinaron que existe una relación estrecha entre el desarrollo de la vegetación y la cobertura de hojas sobre el suelo.

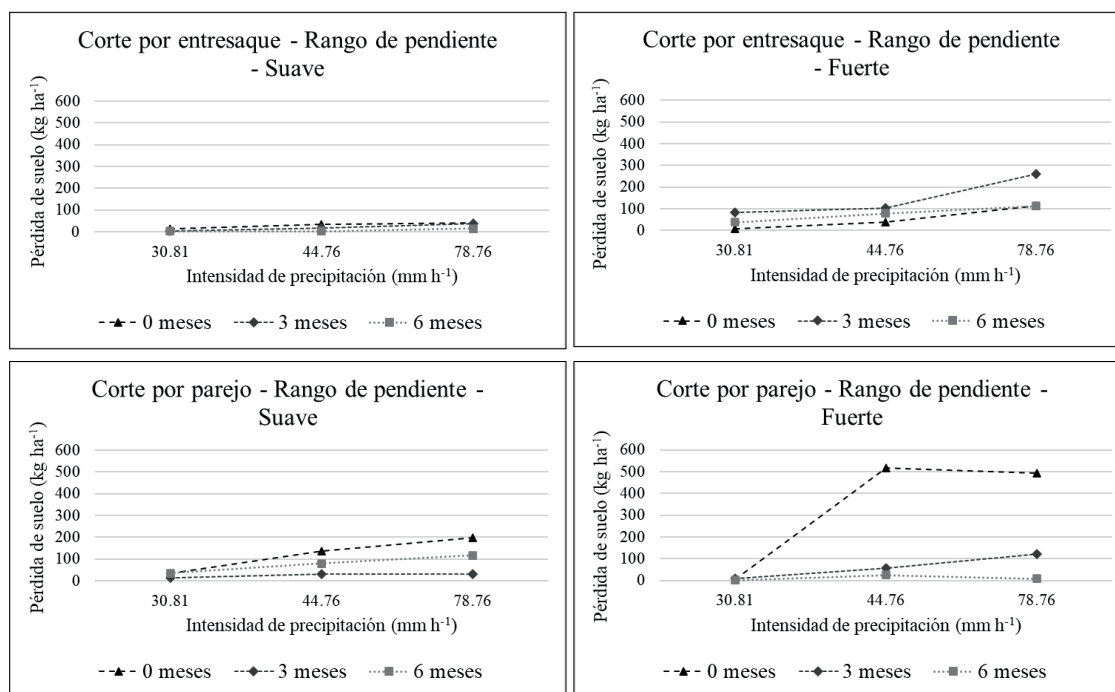


Figura 3. Pérdida de suelo expresada en kg/ha, en las distintas combinaciones método de cosecha y rango de pendiente, bajo los tres niveles de intensidad, en los tres momentos de medición

Fuente: elaboración propia.

Al comparar los datos de pérdida de suelo en el momento justo después del corte, con los datos obtenidos en el lote de primera siembra, se concluyó que las pérdidas de suelo en cultivos establecidos con caña, bajo los dos métodos de cosecha, son mucho menores. Este carácter conservacionista de la caña se puede asociar con la práctica común de mantener el suelo con una cubierta de cosechas anteriores. Portela *et al.* (2018) determinaron que la cubierta del suelo por los residuos del cultivo es una condición de protección física de su superficie, esencial con respecto al control de la erosión hídrica y la escorrentía asociada. Por su parte, Teófilo *et al.* (2019) encontraron que la cobertura vegetal reduce la escorrentía superficial. Silva *et al.* (2019) determinaron que minimiza la energía cinética de las gotas de lluvia y, por lo tanto, el transporte de material en la superficie. Ramos *et al.* (2019) determinaron que los residuos culturales resultan ser más relevantes que la resistencia natural del suelo a la desagregación y al transporte.

En la Figura 1 se resalta nuevamente la pérdida de suelo en el caso de la primera siembra, respecto a los dos métodos de cosecha, ya que corresponde a un lote sin cobertura vegetal, en especial en las intensidades media (44,76 mm/h) y alta (78,76 mm/h). Se observa también que, aunque se presentan mayores pérdidas de suelo en el corte por parejo, con respecto al corte por entresaque, esta diferencia no sobresale al tener pérdidas de suelo notablemente superiores en las mediciones de primera siembra. Teófilo *et al.* (2019) evidenciaron que, en escenarios sin cobertura vegetal, la velocidad de infiltración es menor, por lo que predomina el flujo superficial de agua, lo que genera mayor arrastre de suelo. Por su parte, Ramos *et al.* (2019), establecieron que la cobertura, junto con la rugosidad de la superficie, la velocidad de infiltración del agua, y el carbono orgánico total, tienen las mayores relaciones directas o indirectas con la pérdida de suelo.

En el primer momento (0 meses), sin tener en cuenta la primera siembra, la diferencia entre las mediciones de pérdida de suelo depende del método de cosecha. Independientemente del corte, en cultivos de caña, la planta va perdiendo hojas a lo largo de su ciclo productivo, dando al suelo una capa de cobertura vegetal, sin embargo, las prácticas de limpieza de los surcos en ambos métodos de cosecha son diferentes. En el corte por parejo, se acostumbra a distribuir los restos de hojas de manera uniforme, mientras que en el entresaque no se realiza ninguna actividad de limpieza o distribución de hojas dentro del cultivo. Aunque en ambos métodos de cosecha la cobertura vegetal es similar, las distintas prácticas de cultivo pueden generar cambios en la pérdida de suelo, como lo determinaron Oliveira *et al.* (2013), al comparar dos sistemas de siembra en eucalipto. La comparación de medias resalta nuevamente el corte como el único factor que presenta diferencia estadística significativa entre sus niveles, que en este caso corresponden específicamente a los dos métodos de cosecha.

Generalmente, aspectos como la topografía y el suelo se consideran estáticos, mientras que el clima, el uso de la tierra y el manejo del suelo cambian con el tiempo (Vanwallegghem *et al.*, 2017), lo cual también se evidenció en este caso, al ser el factor pendiente uno de los que menos influyó en la variación de los valores de pérdida de suelo. El manejo del suelo tiene un efecto directo sobre la erosión, y da como resultado una cantidad significativamente diferente de cobertura del suelo, residuos de cultivos que quedan en los campos, rugosidad, humedad (Vanwallegghem *et al.*, 2017), o como en este caso, la cantidad de plantas en pie, especialmente en el momento justo después del corte o la cosecha, influyeron en los cambios de pérdida de suelo. Es por esta razón que en este artículo no solo se logra resaltar la importancia del cultivo de caña de azúcar para producción de panela en términos de su aporte conservacionista, al tener siempre un mantillo importante de cobertura vegetal, práctica importante para reducir el impacto de la lluvia sobre el suelo, sino que, además, se logran comparar los dos métodos de cosecha o sistemas de corte utilizados para este tipo de cultivo, pues esta práctica es específica para este tipo de cultivo.

4. Conclusiones

El método de cosecha se presenta como el principal factor de variación de pérdida de suelo, en el momento justo después del corte. Estas diferencias se explican principalmente por la alta pérdida de suelo en el corte por parejo justo después de la cosecha, en relación con las demás combinaciones de momento de medición y método de cosecha, donde este es el momento en el que se debe poner mayor atención a las prácticas de conservación para reducir las pérdidas de suelo. A medida que el cultivo se desarrolla, las diferencias entre ambos métodos de cosecha disminuyen, y es el momento de medición en sí mismo, otro factor de variación importante, que indica diferencias claras entre el momento justo después del corte y seis meses después, donde el cultivo ya ha cubierto los surcos, reduciendo la pérdida de suelo. Al comparar ambos métodos de cosecha con un suelo descubierto, se resaltó que la pérdida de suelo es significativamente menor en cultivos de caña ya establecidos, con respecto a la condición de suelo en primera siembra sin cobertura vegetal. Además, se señala que este estudio da un primer paso a la comparación entre dos sistemas de corte específicos del cultivo de caña de azúcar para producción de panela, indicando una ventaja ambiental en el sistema de corte por entresaque, con respecto al sistema de corte por parejo.

Agradecimientos

A la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), y a todo el equipo de trabajo del producto “Indicadores de impacto ambiental en la agroindustria panelera”. Este estudio fue financiado por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).

Referencias

- Bandeira, Douglas; Bertol, Ildegardis; Vásquez, Eva; Ramos, Julio; Bertol, Camilo (2019). Impact of pig slurry application on soil and water losses: Comparison with a historical series. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23(6), 425-431.
<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n6p425-431>
- Benmansour, Moncef; Mabit, Lionel; Nouira, Asmae; Moussadek, Rachid; Bouksirate, H.; Duchemin, Marc; Benkdad, Azzouz (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.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.07.013>
- De Almeida, Wilk; Sanchez, Pietro; De Lima, André; De Carvalho, Daniel (2022). InfiAsper: a rainfall simulator with varying precipitation intensity to assess soil erosion. *Revista de Ciencias Agrarias*, 45(4), 518-522.
<https://doi.org/10.19084/rca.28623>
- Dercon, Gerd; Mabit, Lionel; Hancock, Gary; Nguyen, M. L.; Dornhofer, Patcharin; Bacchi, Osny; Benmansour, Moncef; Bernard, Claude; Froehlich, Wojciech; Golosov, Valentin; Hacıyakupoglu, Sevilay; Hai, P. S.; Klik, Andreas; Li, Yong; Lobb, David; Onda, Yuichi; Popa, Nelu; Rafiq, Muhammad; Ritchie, Jerry; ... Zhang, Xinbao (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.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.01.008>
- García, Hugo; Albarracín, Luis; Toscano, Adriana; Santana, Natalia; Insuasty, Orlando (2007). *Guía Tecnológica para el Manejo Integral del Sistema Productivo de Caña Panelera*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA).
- Jaya-Santillán, Juan (2023). Altos niveles de erosión hídrica en una microcuenca tropical calculado mediante el modelo USLE. *FIGEMPA Investigación y Desarrollo*, 15(1), 26-39.
<https://doi.org/10.29166/revfig.v15i1.4269>
- Moradpouri, Farzad; Ahmadi, Seyed; Ghaedrahmati, Reza; Barani, Kianoush (2023). Determination of the erosion level of a porphyry copper deposit using soil geochemistry. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 123(2), 103-112.
<http://doi.org/10.17159/2411-9717/2029/2023>
- Oliveira, Anna; Silva, Marx; Curi, Nilton; Avanzi, Junior; Neto, Gustavo; Araújo, Elías (2013). Water erosion in soils under eucalyptus forest as affected by development stages and management systems. *Ciência e Agrotecnologia*, 37(2), 159-169.
<https://doi.org/10.1590/S1413-70542013000200007>

- Pacci, Sena; Safli, Muhammet; Odabas, Mehmet; Dengiz, Orhan (2023). Variation of USLE-K Soil Erodibility Factor and Its Estimation with Artificial Neural Network Approach in Semi-humid Environmental Condition. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 66, e23220481.
<https://doi.org/10.1590/1678-4324-2023220481>
- Portela, Jeane; Cogo, Neroli; Ribeiro, Jacques; Sequinatto, Letícia; Batista, Rafael; Martins, Carolina; Fernandes, Joaquim (2018). Nutrient losses due to water erosion using simulated rainfall in southern Brazil. *DYNA*, 85(206), 236-241.
<https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.71084>
- Ramos, Júlio; Bertol, Ildegardis; Bandeira, Douglas; Barbosa, Fabrício; Zangiski, Fernanda (2019). Path coefficient analysis, a different approach to identify soil quality indicators. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23(7), 545-551.
<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n7p545-551>
- Salcedo, Selima; Canihua, Jorge; Samaniego, Tomás; Cruz, Juancarlos; Pérez, Wendy; Cosme, Roberto (2022). Cultivos de cobertura asociados a quinua (*Chenopodium quinoa* Wild) en el Altiplano peruano: Reducción de la erosión, mejora de la salud del suelo y rendimiento agrícola. *Scientia Agropecuaria*, 13(3), 265-274.
<https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.024>
- Sanchez, Pietro; Ferreira, Marinaldo; Sobrinho, Teodorico; Schultz, Nivaldo; Rodrigues, Thiago; de Carvalho, Daniel (2021). A modified portable rainfall simulator for soil erosion assessment under different rainfall patterns. *Journal of Hydrology*, 596, 126052.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126052>
- Senninger (24 de mayo de 2023a). *i-Wob 2*.
<https://www.senninger.com/es/product/i-wob2-e-i-wobr-up3>
- Senninger (24 de mayo de 2023b). *Mini-Wobbler*.
<https://www.senninger.com/es/product/mini-wobbler>
- Silva, Fábio; Souza, Thais; Souza, Edivan; Correa, Marcelo; Rolim, Mário (2019). Surface sealing and water erosion of soils with mulching in the semi-arid region of Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23(4), 277-284.
<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n4p277-284>
- Silva, Camilo; Andrade, Eunice; Lemos, Luis; Ribeiro, Jacques; Oliveira, Hermínio (2021). Temporal dynamics of soil susceptibility to erosion in semiarid watersheds. *Acta Scientiarum, Agronomy*, 43, e51378.
<https://doi.org/10.4025/actasciagron.v43i1.51378>
- Sousa, Marcos; Palacio, Helba; Andrade, Eunice; Ribeiro, Jacques; Silva, Matheus (2020). Determinant pluviometric characteristics of sediment transport in a catchment with thinned vegetation in the tropical semiarid. *Revista Caatinga*, 33(3), 785-793.
<https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n322rc>
- Tauta, José; Camacho, Jesús; Rodríguez, Gonzalo (2018). Estimación de erosión potencial bajo dos sistemas de corte de caña panelera utilizando la ecuación universal de pérdida de suelos. *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 405-413.
<https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1074>

- Teófilo, Eduardo; Morales, Guillermo; Muciño, René; Esteller, María (2019). Experimentación reducida-controlada in situ del deslizamiento de suelo por efecto de flujo subsuperficial de agua. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 20(3), 1-12.
<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n3.026>
- Tong, Xin; Hao, Baoer; Chen, Zhi; Liu, Haiyang (2023). Wind erosion resistance effect of conservation tillage: the case of chestnut soil in *Mongolian Plateau*. *Revista Ciencia Agronómica*, 54, e20228408.
<https://doi.org/10.5935/1806-6690.20230015>
- Thomaz, Edivaldo; Marcatto, Francieli; Antoneli, Valdemir (2022). Soil erosion on the Brazilian sugarcane cropping system: An overview. *Geography and Sustainability*, 3, 129-138.
<https://doi.org/10.1016/j.geosus.2022.05.001>
- Valdivia, Oscar; Peña, Gabriel; Rufino, Fernando; Torres, Jorge; Meraz, Antonio; López, Armando (2022). Ajuste de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo en parcelas de escurrimiento ubicadas en una región del centro de México. *Terra Latinoamericana*, 40, e990.
<https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.990>
- Vanwallegem, Tom; Gómez, José; Infante-Amate, Juan; González, M.; Vanderlinden, Karl; Guzmán, Gema; Laguna, Ana; Giráldez, Juan (2017). Impact of historical land use and soil management change on soil erosion and agricultural sustainability during the Anthropocene. *Anthropocene*, 17, 13-29.
<https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.01.002>
- Wischmeier, Walter; Smith, Dwight (1978). *Predicting erosion losses, a guide to conservation planning*. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.
- Wu, Bing; Li, Ludi; Xu, Ling; Li, Xinlu (2022). Modelling sheet erosion on steep slopes of clay loess soil using a rainfall simulator. *Biosystem Engineering*, 216, 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.01.017>
- Youlton, Cristian; Bragion, Ana; Wendland, Edson (2016). Experimental evaluation of sediment yield in the first year after replacement of pastures by sugarcane. *Ciencia e Investigación Agraria*, 43(3), 374-383.