



Dinámica temporal de erosión del suelo en café (*Coffea arabica*), Llano Brenes, Costa Rica¹

Temporal dynamics of soil erosion in coffee (*Coffea arabica*), Llano Brenes, Costa Rica

Teresa Palominos-Rizzo², Mario Villatoro-Sánchez³, Alfredo Alvarado-Hernández³, Víctor Cortés-Granados⁴,
Darwin Paguada-Pérez⁵

- ¹ Recepción: 18 de enero, 2022. Aceptación: 28 de marzo, 2022. El presente trabajo formó parte de la tesis de doctorado de la primera autora. Financiado por la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación del Ecuador.
- ² Universidad de Costa Rica, Sistema de Estudios de Posgrado Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales, San José 11501-2060, Costa Rica. teresa.palominos@catie.ac.cr (autor para la correspondencia; <https://orcid.org/0000-0002-0705-6862>).
- ³ Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas, San José 11501-2060, Costa Rica. mario.villatoro@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0002-6678-5854>); alfredo.alvarado@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0002-6930-6660>).
- ⁴ Universidad de Costa Rica, Escuela de Geografía, San José 11501-2060, Costa Rica. victor.cortes@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0001-8053-9126>).
- ⁵ Consultor independiente, San José, Moravia 11401, Costa Rica. darwin.paguada@catie.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0002-1257-9369>).

Resumen

Introducción. La erosión hídrica es un fenómeno natural, acelerado por la actividad humana, que facilita la degradación de los suelos y el transporte de sedimentos a otras zonas. **Objetivo.** Cuantificar la escorrentía superficial y la tasa de erosión a escala de parcela, bajo eventos de precipitación natural, en un suelo Entisol sembrado con café (*Coffea arabica*) con sombra, y determinar la dinámica temporal y la influencia de los principales factores asociados con este proceso. **Materiales y métodos.** El estudio se desarrolló en Llano Brenes, Alajuela, Costa Rica. Se instalaron nueve parcelas de escorrentía, los datos fueron recolectados entre mayo de 2018 y noviembre de 2019, cada parcela tuvo un medidor de escorrentía y un contenedor para la toma de muestras de sedimentos. Se instalaron tres sensores de reflectometría de dominio temporal para las mediciones de contenido superficial de humedad del suelo. El análisis de datos se realizó a escala mensual-anual, inter-evento e intra-evento. En la escala intra-evento se utilizó el modelo de infiltración de Diskin y Nazimov. **Resultados.** En los años 2018 y 2019 se obtuvieron, respectivamente, los siguientes resultados anuales: a) lámina total de escorrentía de 90,99 y 102,66 mm, b) concentración de sedimentos de 2,14 y 1,88 g L⁻¹, y c) pérdida de suelo de 1612 y 1692 g m⁻². Los mayores valores de pérdida de suelo se obtuvieron en octubre de cada año; el análisis intra-evento explicó la generación de escorrentía con base la lámina de precipitación y el contenido de humedad inicial en el evento. **Conclusión.** La tasa de erosión y la escorrentía medias anuales fueron de 1652 g m⁻² y 96,8 mm, respectivamente. La lámina de precipitación, intensidades y contenido inicial de humedad superficial del suelo tuvieron un importante rol en la generación de escorrentía y pérdida de suelo.

Palabras claves: escorrentía, *Coffea*, suelos tropicales, infiltración.



Abstract

Introduction. Water erosion is a natural phenomenon accelerated by human activity, which facilitates soil degradation and sediment transport to other areas. **Objective.** To quantify the surface runoff and erosion rate at the plot scale, under natural precipitation events in an Entisol soil cultivated with shaded coffee (*Coffea arabica*) and to determine the temporal dynamics and the influence of the main factors associated with this process. **Materials and methods.** The study was developed in Llano Brenes, Alajuela, Costa Rica. Nine runoff plots were installed, the data was collected between May 2018 and November 2019, each plot had a runoff meter and a container for collecting sediment samples. Three-time domain reflectometry sensors were installed for surface soil moisture content measurements. Data analysis was carried out on a monthly-annual, inter-event and intra-event scale. At the intra-event scale, the Diskin & Nazimov infiltration model was applied. **Results.** In the years 2018 and 2019, the following annual results were obtained, respectively: a) total runoff sheet of 90.99 and 102.66 mm, b) sediment concentration of 2.14 and 1.88 g L⁻¹, and c) soil loss of 1612 and 1692 g m⁻². The highest soil loss values were obtained in October of each year. The intra-event analysis explained the runoff generation based on the precipitation sheet and the initial moisture content in the event. **Conclusion.** The mean annual erosion rate and runoff were 1652 g m⁻² and 96.8 mm. The precipitation sheet, intensities, and initial surface soil moisture content played an important role in runoff generation and soil loss.

Keywords: runoff, *Coffea*, tropical soils, infiltration.

Introducción

El suelo es un recurso vital para los seres humanos, es la base de toda la vida terrestre y es un recurso no renovable en la escala de tiempo humano (Eswaran et al., 2001). Su formación requiere de largos períodos, donde 1 cm de formación puede llevar hasta mil años. El suelo además brinda bienes y servicios ambientales (Amundson et al., 2015; Verheijen et al., 2009), sostiene la seguridad alimentaria (Lal, 2001) y la calidad ambiental. Tiene como principales funciones: satisfacer la demanda de alimentos, filtrar el aire, purificar el agua y almacenar carbono para compensar las emisiones de dióxido de carbono CO₂ (Blanco-Canqui & Lal, 2010).

El suelo se ve afectado entre otros factores por la erosión hídrica, definida como el desprendimiento, transporte y sedimentación de partículas por acción del agua (Lal, 2001; Wischmeier, 1959). La erosión hídrica laminar es la menos perceptible, aunque genera el 70 % del total de la erosión del suelo (Blanco-Canqui & Lal, 2010), con efectos negativos en suelos poco profundos como los Entisoles. La erosión del suelo es un importante problema ambiental (Montgomery, 2007), ya que perturba su productividad, el bienestar humano (Pimentel et al., 1976), la calidad del agua y el uso de los recursos hídricos por la sedimentación transportada fuera de su sitio de origen (Anache et al., 2017; Damnati et al., 2013; Wuepper et al., 2020).

La generación e intensidad de la erosión del suelo se ve influenciada por diferentes agentes, tales como la precipitación (Ghahramani & Ishikawa, 2013), la intensidad y duración de la lluvia (Chen et al., 2018; Mohamadi & Kavian 2015; van Dijk et al. 2002), la humedad precedente del suelo (Luk, 1985; Villatoro-Sánchez et al., 2015), la cobertura vegetal (Dong et al., 2018; Yao et al., 2018), las características, morfología de los suelos y la pendiente (Alcázar Torralba, 2013; Wischmeier & Smith, 1978), entre otros.

Para estudiar la erosión hídrica, uno de los métodos más utilizados es la parcela de escorrentía bajo condiciones de lluvia natural (Maetens et al., 2012), con la que se han realizado muchos estudios para determinar la pérdida de suelo y escorrentía superficial (García-Ruiz et al., 2015) y se han evaluado la influencia de la precipitación (Fortugno et al., 2017), la pendiente (Fang et al., 2017), las medidas de conservación y la cobertura vegetal (Gómez

et al., 2011) sobre la escorrentía y la pérdida de suelo. Las mediciones de las parcelas de escorrentía, proporcionan información sobre las tasas reales de erosión (Xiong et al., 2019).

A nivel mundial se han realizado algunos estudios en plantaciones de café (*Coffea arabica*) con parcelas de escorrentía bajo diferentes porcentajes de pendiente, prácticas agronómicas y tamaño (Ataroff & Monasterio, 1997; Cannavo et al., 2011; Gómez-Delgado et al., 2011; Vahrson & Cervantes, 1991; Villatoro-Sánchez et al., 2015). En Costa Rica hay pocos estudios que evalúan la erosión de suelo en parcelas de escorrentía en pendientes >30 % (Vahrson & Cervantes, 1991; Villatoro-Sánchez et al., 2015). El cultivo de café es de gran interés, por su importancia en la economía de Costa Rica, puesto que ocupa el tercer lugar en productos de exportación agrícola (Instituto del Café de Costa Rica, 2020).

Es importante comprender los procesos de generación de escorrentía y erosión en pendientes escarpadas y en áreas tropicales bajo cultivos permanentes como el café. El objetivo de este estudio fue cuantificar la escorrentía superficial y la tasa de erosión a escala de parcela, bajo eventos de precipitación natural, en un suelo Entisol sembrado con café con sombra y determinar la dinámica temporal y la influencia de los principales factores asociados con este proceso.

Materiales y métodos

Sitio de estudio

La investigación se desarrolló en el caserío de Llano Brenes del distrito de San Rafael, en el cantón San Ramón de la provincia de Alajuela (10,005439° N 84,467965° O, 1094 m s.n.m.), en la cuenca superior del río Jesús María. El sitio de estudio fue un suelo sembrado con café (*Coffea arabica*) variedad Catuaí, con una densidad de siembra de 3330 plantas por hectárea. El tipo de sombra corresponde a poró (*Erythrina poeppigiana*) y banano (*Musa* sp.). El suelo se clasifica como Lithic Ustorthents (Soil Survey Staff, 2014), con relieve escarpado y buen drenaje (Molina Campos, 2015). Se realizó una validación de la metodología utilizada en la investigación de Villatoro-Sánchez et al. (2015).

Se instalaron nueve parcelas de escorrentía en mayo de 2017, los datos fueron recolectados entre mayo de 2018 a noviembre de 2019 (el periodo lluvioso en la zona es de mayo a noviembre). Cada parcela midió 4 m de ancho en el sentido de las curvas de nivel y 20 m de largo en la dirección de la pendiente. La diferencia entre las pendientes de las parcelas fue no significativa (Mann-Whitney U, $p=0,064$). El área de cada parcela se estimó con el porcentaje de pendiente (Cuadro 1).

Cuadro 1. Características de la pendiente en las parcelas de escorrentía. Suelo Entisol en una plantación de café (*Coffea arabica*), con sombra. Llano Brenes, Alajuela, Costa Rica, 2018 – 2019.

Table 1. Characteristics of the slope in the runoff plots. Entisol soil in a shaded coffee (*Coffea arabica*) plantation. Llano Brenes, Alajuela, Costa Rica, 2018 – 2019.

	Parcelas									DE
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Área inclinada (%)	65,54	66,46	69,20	70,10	71,55	65,85	65,54	65,54	65,23	2,40
Pendiente (%)	70,00	67,00	58,00	55,00	50,00	69,00	70,00	70,00	71,00	7,92

DE: desviación estándar. / DE: standard deviation.

Características de las parcelas

Las parcelas se cerraron con un límite artificial desmontable (lámina de metal de 22 cm de altura), para evitar el ingreso de flujos laterales de agua de escorrentía hacia las parcelas. En la parte superior externa de cada conjunto de parcelas, se construyó un canal de drenaje para interrumpir los posibles flujos superficiales y subsuperficiales de agua procedentes de las zonas más altas de la ladera (Figura 1a).

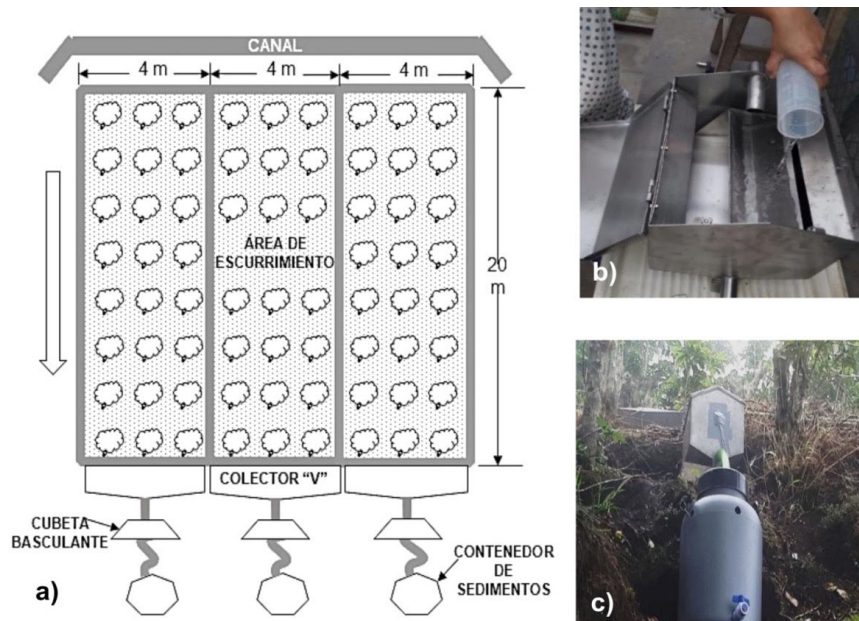


Figura 1. a) Esquema de las parcelas de escorrentía. b) Receptáculos de cubeta basculante (dos). c) Cubeta basculante unida al contenedor de sedimentos. Suelo Entisol en una plantación de café (*Coffea arabica*), con sombra. Llano Brenes, Alajuela, Costa Rica, 2018 – 2019.

Figure 1. a) Scheme of the runoff plots. b) Tipping bucket receptacles (two). c) Tipping bucket attached to the sediment container. Entisol soil in a shaded coffee (*Coffea arabica*) plantation. Llano Brenes, Alajuela, Costa Rica, 2018 – 2019.

En la parte terminal de cada parcela, se instaló un colector de tipo “V” de estructura metálica con una base de hormigón, para canalizar el agua de escorrentía superficial hacia el sistema de medición de cubetas basculantes (Figura 1b) y luego al contenedor de sedimentos con capacidad de 40 L y con rebalse (Figura 1c). El colector presentó una superficie total de 4,5 m² y una pendiente lateral (hacia el centro de la parcela) del 2 %.

Determinación de la escorrentía superficial, sedimentos y pérdida de suelo

La escorrentía superficial se midió por sensores activados por el volteo de los receptáculos de las cubetas basculantes. Los receptáculos tenían 1 L de capacidad cada uno. En cada volteo el sensor enviaba una señal a un registrador automático de datos. Los sensores se calibraron previo a ser instalados, mediante curvas de ajuste (Villatoro-Sánchez et al., 2015).

Se realizaron visitas diarias al campo durante la época lluviosa, para la toma de muestras de sedimentos. Se tomaron muestras de 470 mL después de agitar cada contenedor de sedimentos (Figura 1c). Las muestras

recolectadas se llevaron al laboratorio para determinar la concentración de sedimentos mediante el método de secado al horno (Villatoro-Sánchez et al., 2015), estos análisis se realizaron en el Laboratorio de Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica. La concentración de sedimentos medida en cada muestra, se multiplicó por un factor de corrección (1,52) obtenido de la calibración (Bagarello & Ferro, 1998), para lo cual se utilizaron muestras de suelo superficial del mismo sitio de las parcelas y se prepararon diferentes concentraciones (1, 5, 10, 20 g L⁻¹) en volúmenes de 5, 20 y 40 L.

La pérdida de suelo en g m⁻², se calculó a partir del producto de la concentración de sedimentos corregida por la calibración y la lámina de escorrentía en mm o L m⁻² por evento de lluvia interceptada. Para determinar la cantidad de sedimentos depositados en el colector tipo “V”, se pesó y secó el volumen total recogido (Alcázar Torralba, 2013), lo que fue agregado a la medición de erosión total. Para estimar la pérdida total de suelo (PS) se utilizó la ecuación (1):

$$PS = CS * Ro \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde PS es la pérdida de suelo en g m⁻², CS es la concentración de sedimentos en g L⁻¹ y Ro es la lámina de escorrentía en mm o L m⁻².

Determinación del contenido de humedad en el suelo

Se instalaron tres sensores de reflectometría de dominio temporal (TDR) modelo CS616 (Campbell Sci, 2020) en el sitio. Se tomaron mediciones a una profundidad de 0,30 m. El contenido de humedad del suelo medido, se corrigió mediante calibración previa de sensores insertados en núcleos de suelo no perturbados de las mismas parcelas (Khan et al., 2011; Naranjo & Ataroff, 2015) y tomados a la profundidad de 0,30 m.

Determinación de cambios en la cobertura del suelo y del café

El índice de cobertura de café (Cc), representó el nivel de cobertura de la inter-fila de café por las hojas y ramas de la biomasa aérea del cultivo. La cobertura fue alta (Cc = 3) si las ramas de café de líneas contiguas se superponían; media (Cc = 2) si las ramas de café de líneas contiguas se superponían en un 50 % del área evaluada; y pobre (Cc = 1) si ninguna rama de los árboles de café de las filas adyacentes se tocaban entre sí (Villatoro-Sánchez et al., 2015). También se recolectaron datos de cobertura vegetal en cada parcela con el uso de un densiómetro esférico.

Registro de eventos de lluvia

Se instaló una estación meteorológica Davis Vantage ProPlus (propiedad del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica) en el sitio de estudio para cuantificar precipitación. Los datos se complementaron con los registrados en la estación meteorológica Davis Vantage ProPlus instalada y administrada por el Instituto del Café de Costa Rica (ICAFE), ubicada a 6 km del área de estudio y a una altura de 1200 m s.n.m. Se consideró un evento de lluvia desde que este comenzó hasta que no se registró más escorrentía de la parcela, incluso después de que la lluvia hubiera terminado. Si no se registró escorrentía, el evento terminó al final de la lluvia.

Se separaron los eventos con un período de seis horas sin lluvia como umbral (Wischmeier & Smith, 1978). La precipitación se separó en tres categorías preliminares: Categoría L (<20 mm como lámina de lluvia baja, debido a su escasa contribución a la producción de escorrentía), Categoría M (láminas de lluvia entre 20 y 40 mm,

consideradas como media) y Categoría H (mayor de 40 mm, láminas consideradas como altas, que por lo general producen escorrentía alta) (Villatoro-Sánchez et al., 2015).

Análisis de datos

Se evaluaron los datos bajo tres escalas temporales: mensual-anual, inter-evento e intra-evento. La organización de los datos tomados en campo y el modelo de infiltración para el análisis intra-evento se realizaron en Microsoft Excel. El análisis estadístico se realizó con el Software RStudio (R Core Team, 2020). Todos los datos se ajustaron a una escala de tiempo de una hora.

Escala mensual-anual

Para conocer la distribución anual de la escorrentía y de la erosión, se realizó un análisis a escala mensual-anual. Las variables evaluadas fueron: precipitación total (mm) acumulada por mes, promedio máximo de intensidad de la lluvia (mm h^{-1}), intensidad de lluvia máxima a 30 min (mm h^{-1}), escorrentía total (mm) medida para cada evento de precipitación, concentración media de sedimentos (g L^{-1}) y pérdida total del suelo (g m^{-2}).

Escala inter-evento

Se cuantificó la contribución de cada evento de precipitación y se explicaron los procesos de escorrentía y erosión en la escala de eventos en su conjunto (Villatoro-Sánchez et al., 2015). Los datos se presentaron como acumulados, se analizó la información de los años 2018 y 2019 y se evaluó su normalidad (Test de Shapiro Wilk). Debido a que no se alcanzó la normalidad, se utilizó una correlación no paramétrica (Spearman) y análisis de gráficos. Se caracterizó cada mes por el número de eventos “n”, de acuerdo con la clasificación de las láminas de las precipitaciones (Categorías L, M y H).

El análisis de correlación utilizó las siguientes variables: lámina de escorrentía (mm), concentración de sedimentos (g L^{-1}), pérdida de suelo (g m^{-2}), humedad volumétrica del suelo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); índice de cobertura de café y cobertura vegetal (%), características de la precipitación: total de precipitación en mm, duración total de la lluvia en minutos, intensidad máxima de lluvia en 30 min (mm h^{-1}) e intensidad de lluvia promedio máxima (mm h^{-1}). Los eventos de precipitación y escorrentía se agruparon de forma arbitraria en tres rangos de contenido de agua en el suelo a 0,30 m de profundidad. Se consideró que el contenido de agua en el suelo fue bajo cuando los valores fueron inferiores al 56,9 %, medio entre 57,0 y 59,9 % y muy alto cuando los valores estuvieron por encima del 60,0 %.

Escala intra-evento

Para el análisis a escala intra-evento se utilizaron los eventos críticos de lluvia-escorrentía (intra-precipitaciones). Se seleccionaron veintiún eventos con un registro de lámina de escorrentía superior a 1 mm. Para modelar la cantidad total de escorrentía se tomó en cuenta la distribución temporal de la precipitación a intervalos de tiempo de 1 hora, se utilizó el modelo de infiltración-escorrentía de tipo reservorio explicado por Diskin y Nazimov (1995).

El modelo de infiltración tiene dos elementos, el primero es el regulador de la entrada $f(t)$, que regula el agua que proviene de la lluvia, $R(t)$. Si la precipitación es mayor que la capacidad de infiltración de la capa superficial del suelo, $q(t)$, la diferencia se convierte en escorrentía, $y(t)$; caso contrario, la tasa de infiltración es igual a la lluvia y se conoce como tasa de infiltración real. El segundo componente es un elemento de reservorio, dado por la

misma capa superficial del suelo que regula la cantidad de agua que se infiltra, $g(t)$, en función del almacenamiento de agua del suelo. La variable estado para el elemento regulador f es determinada por la magnitud de la variable estado del reservorio S (ecuación 2), de acuerdo con la relación de Diskin y Nazimov (1995):

$$f = f_0 + (f_c - f_0) \frac{S}{S_m} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde f_0 es la capacidad máxima de infiltración cuando el almacenamiento del contenido superficial de agua en la capa de suelo es muy bajo (cerca del punto de marchitez), f_c es la capacidad mínima de infiltración cuando el contenido superficial de agua del suelo se encuentra en el punto de saturación, S_m es el máximo almacenamiento de agua en el suelo y S son las condiciones de almacenamiento basadas en la humedad del suelo. Las salidas (y) y (q) del elemento regulador dependen del valor de la variable estado f y del valor de la entrada R en el mismo instante, esto de acuerdo con las ecuaciones 3 y 4.

$$\text{si } R < f \quad \text{entonces } q = R; y = 0 \quad \text{Ecuación (3)}$$

$$\text{si } R > f \quad \text{entonces } q = f; y = R - f \quad \text{Ecuación (4)}$$

La salida del reservorio g se calcula con la función de S , según la ecuación 5:

$$g = f_c \frac{S}{S_m} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Los parámetros del modelo f_c y f_0 , se estimaron mediante optimización con el gradiente reducido no lineal generalizado (GRG) y se impusieron límites de tasas de infiltración para $f_c \leq 40 \text{ mm h}^{-1}$ y para $f_0 \leq 150 \text{ mm h}^{-1}$ $f_c \geq$, mientras que S_m se estimó a partir de los datos de campo. Se representó mediante un hidrograma de salida la escorrentía total para cada evento de inundación. Se comparó la similitud de la distribución de las categorías de profundidad de escorrentía total observadas entre las estimadas para cada evento de lluvia.

Resultados

Tendencia de la precipitación a escala mensual-anual

Los datos presentados fueron los eventos que tuvieron registro de todas las variables. El total de precipitación de estos eventos en las estaciones lluviosas de los dos años fueron similares (1086 mm en 2018 y 955 mm en 2019), pero la distribución mensual entre ambos años tuvo variaciones. Los meses con más precipitación en el 2018 fueron mayo, septiembre y octubre, mientras que en el 2019 fueron mayo, agosto y octubre. La mayor acumulación de precipitación en estos meses representó el 85,7 % del total de precipitación del 2018 y el 67,3 % en el 2019 (mayo a noviembre). El mes de mayo en los dos años fue el más lluvioso (Cuadro 2). Las intensidades promedio máximas de lluvia siguieron el mismo patrón de los meses con más precipitación.

Tendencia de la escorrentía y pérdida de suelo a escala mensual-anual

La lámina total de escorrentía anual fue de 91 mm en el 2018 y 103 mm en el 2019 (Cuadro 2). El mes de octubre presentó el valor más alto registrado de escorrentía (48,8 % en el 2018 y 24,3 % en el 2019 de la escorrentía

Cuadro 2. Resumen de las variables de precipitación, escorrentía, sedimentos y pérdida de suelo a escala de parcela. Suelo Entisol en una plantación de café (*Coffea arabica*), con sombra. Llano Brenes, Alajuela, Costa Rica, 2018 – 2019.

Table 2. Summary of precipitation, runoff, sediments, and soil loss variables at plot scale. Entisol soil in a shaded coffee (*Coffea arabica*) plantation. Llano Brenes, Alajuela, Costa Rica, 2018 – 2019.

Variable	Año	Anual	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre
Precipitación total (mm)	2018	1085,6	421,6	35,0	14,7	100,2	230,4	277,8	4,8
	2019	955,0	305,4	145,7	45,9	178,5	92,8	159,2	27,4
Promedio de intensidad de lluvia máximo (mm h ⁻¹)	2018	21,0	21,0	3,9	2,5	6,4	10,4	8,3	1,2
	2019	19,9	9,0	7,7	2,3	11,3	4,2	19,9	3,5
Intensidad de lluvia máxima a 30 min (mm h ⁻¹)	2018	81,6	81,6	11,7	6,2	58,4	75,4	51,6	5,5
	2019	63,6	44,4	24,4	11,2	63,6	46,4	53,6	24,4
Escorrentía total (mm)	2018	91,0 (0,8)	14,3 (0,4)	4,2 (0,5)	2,3 (0,5)	4,0 (0,2)	21,7 (1,2)	44,4 (0,7)	0,1 (0,0)
	2019	102,7 (0,9)	18,3 (0,5)	7,8 (0,3)	2,9 (0,1)	22,2 (1,4)	21,0 (1,3)	25,0 (1,6)	5,4 (0,6)
Concentración de sedimentos (g L ⁻¹)	2018	2,14 (1,17)	1,81 (0,65)	1,11 (0,08)	2,48 (0,00)	1,50 (0,97)	2,06 (1,11)	2,61 (1,33)	1,87 (0,00)
	2019	1,88 (1,34)	1,82 (0,90)	1,02 (0,55)	0,46 (0,16)	2,49 (1,71)	2,21 (1,07)	2,63 (0,36)	4,54 (1,93)
Pérdida de suelo (g m ⁻²)	2018	1612,0 (70,1)	28,4 (0,9)	5,0 (0,6)	5,8 (1,2)	6,7 (0,4)	40,9 (2,5)	1525,0* (107,1)	0,3 (0,1)
	2019	1692,0 (79,3)	39,0 (1,1)	9,9 (0,5)	1,4 (0,1)	100,1 (7,6)	56,7 (4,7)	1453,0* (245,7)	31,9 (4,0)

Desviación estándar entre paréntesis / Standard deviation in brackets.

* La pérdida de suelo tuvo un incremento debido al sedimento colectado en los colectores de las parcelas / * The soil loss had an increase due to the sediment collected in the collection channel of the plot.

total anual). Sin embargo, este mes reportó 25,6 % en el 2018 y 16,7 % en el 2019 del total de precipitación durante la estación lluviosa. Durante el 2018 los meses de junio, julio, agosto y noviembre fueron los que registraron menos escorrentía (11,6 % de la escorrentía anual). En el 2019 los meses que reportaron menor escorrentía fueron julio y noviembre con el 8,1 % de la escorrentía total.

La concentración promedio de sedimentos fue de 2,14 g L⁻¹ durante el 2018 y de 1,88 g L⁻¹ en el 2019 (Cuadro 2). Una comparación estadística realizada entre los promedios mensuales de los dos años, indicó que las medias anuales fueron estadísticamente iguales (Mann-Whitney U, p=0,71). Sin embargo, hubo diferencias en algunas comparaciones del mismo mes en cada año a excepción de los meses de mayo, junio y septiembre (Mann-Whitney U p=0,21; p=0,59 y p=0,23, respectivamente). Los promedios anuales de la pérdida de suelo fueron estadísticamente iguales (Mann-Whitney U, p=0,94). Durante el 2018 la pérdida de suelo fue de 1612 g m⁻² y en el 2019 fue de 1692 g m⁻² (Cuadro 2).

El mes de octubre en ambos años fue el que presentó una mayor pérdida de suelo, el 94,6 % en el 2018 y el 85,9 % en el 2019 del total anual (Figura 2). Esto se debió en parte a que en este mes se recolectaron los sedimentos acumulados en los colectores, cantidad que fue sumada a la pérdida de suelo mensual.

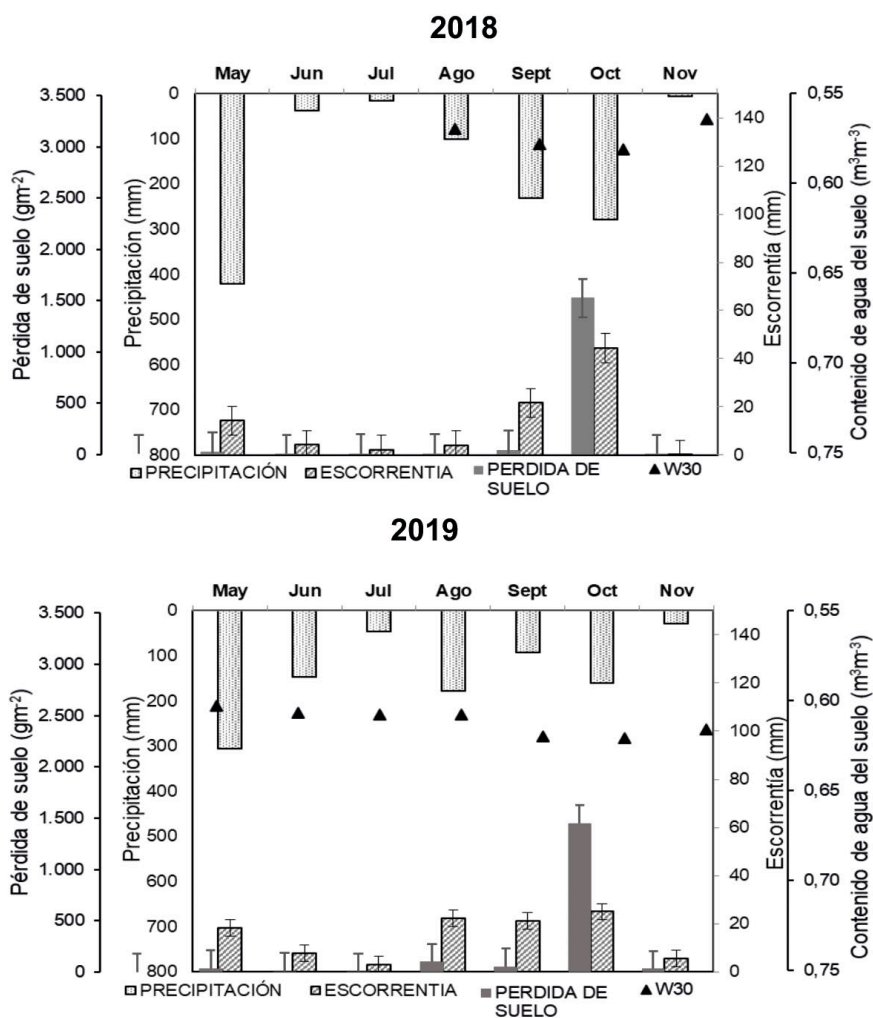


Figura 2. Lámina de escorrentía mensual, pérdida de suelo, contenido de humedad de suelo a una profundidad de 0,30 m (W30) y precipitación total. Suelo Entisol en una plantación de café (*Coffea arabica*) con sombra. Llano Brenes, Alajuela, Costa Rica. 2018 – 2019.

Figure 2. Monthly runoff sheet, soil loss, soil water content at a depth of 0,30 m (W30), and total rainfall. Entisol soil in a shaded coffee (*Coffea arabica*) plantation. Llano Brenes, Alajuela, Costa Rica. 2018 – 2019.

Tendencia del contenido de agua en el suelo a escala mensual-anual

Los valores de la humedad del suelo promedio presentaron diferencias estadísticas entre el 2018 y 2019 (Mann-Whitney U, $p=0,03$), con los mayores contenidos de agua durante los meses de septiembre y octubre ($0,58 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el 2018 y $0,62 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el 2019). En las mediciones realizadas durante el 2019, al inicio de la temporada lluviosa, los valores fueron más bajos en el mes de mayo (Figura 2).

Características de los eventos de precipitación a escala inter-evento

En la época lluviosa (mayo a noviembre) se registraron 39 eventos tanto en el 2018 como en el 2019. En el 2018 el 38,8 % de los eventos de lluvia ocurrieron en mayo, 21,2 % en septiembre y 25,6 % en octubre. Durante el 2019, el 28,1 % de los eventos de lluvia fueron en mayo, seguidos de 16,4 % en agosto y 14,7 % en octubre, en este año los eventos en septiembre y octubre fueron menores en comparación con el 2018.

Durante el 2018, la mayoría de los eventos fueron categoría L (veinte eventos), lo que representó el 18,2 % del total de precipitación anual, que a su vez generaron el 17,4 % de la escorrentía total y el 1,6 % de pérdida de suelo; los eventos tipo H (ocho) agruparon el 52,5 % de la precipitación total, el 59,0 % de generación de escorrentía y el 95,7 % de la pérdida de suelo; mientras que los eventos M (once) representaron el 29,38 % de la precipitación, el 23,5 % de la escorrentía total y una pérdida de suelo de 2,6 %. En el 2019, la mayoría de los eventos también fueron categoría L (veintidós eventos) y representaron el 25,0 % de la precipitación total anual y el 2,08 % del total de la pérdida de suelo. Los eventos tipo M (doce) agruparon la mayor cantidad de precipitación total anual (38,2 %), 45,5 % de la escorrentía total y el 8,4 % de pérdida de suelo; mientras que los eventos H (cinco) agruparon el 36,8 % de la precipitación total y generaron el 89,5 % de la pérdida de suelo con 33,8 % de la escorrentía total (Cuadro 3).

Las curvas acumuladas de precipitación presentaron diferentes incrementos en los dos años. En el 2018, se observó una mayor pendiente de la curva en los meses de mayo, septiembre y octubre, con una pausa en junio, julio y noviembre, que corresponden a los meses donde se presentó menos precipitación. Durante el 2019, la curva presentó una pendiente más pronunciada en mayo, agosto, septiembre y octubre (Figura 3).

Características de los eventos de escorrentía y pérdida de suelo a escala inter-evento

En el 2018 el 82,6 % de la escorrentía generada fue producida por el 48,7 % de los eventos de precipitación registrados. Para el 2019 el 43,6 % de los eventos de precipitación generaron 79,3 % de la escorrentía. Los patrones de la estación lluviosa tuvieron algunas similitudes en las curvas de acumulación de escorrentía en la escala de eventos para ambos años. Los meses con mayores incrementos en precipitación fueron mayo y octubre (Figura 3) y la tasa de acumulación de escorrentía en los dos años fue estadísticamente igual (Mann-Whitney U, $p=0,41$).

La pérdida de suelo siguió una tendencia similar a la escorrentía, donde octubre fue el mes que tuvo el incremento más alto (Figura 3). En el 2018 el mes de octubre reportó la más alta concentración de sedimentos ($1,87 \text{ g L}^{-1}$), mientras en el 2019 el valor más elevado lo reportó el mes de noviembre ($4,52 \text{ g L}^{-1}$), seguido de octubre ($2,63 \text{ g L}^{-1}$).

Características del contenido de humedad del suelo a escala inter-evento

El contenido de agua del suelo (Figura 3) correspondió a la condición inicial al comienzo del evento de lluvia y no al promedio representado en la Figura 2, esto para identificar la dinámica del contenido de agua al inicio de cada evento de lluvia. En el 2018 esta variable se empezó a medir en agosto y tuvo un incremento en septiembre y octubre, lo cual coincidió con los meses con mayor generación de escorrentía. En 2019 las mediciones comenzaron en mayo y los valores disminuyeron en junio y julio, para luego presentar un incremento en agosto, septiembre y octubre (meses con mayor escorrentía en ese año).

Cuadro 3. Características de los eventos de precipitación basadas en las tres categorías de láminas de lluvia (L:<20 mm; M: 20-40 mm y H:>40 mm) por eventos y números de eventos. Suelo Entisol en una plantación de café (*Coffea arabica*) con sombra. Llano Brenes, Alajuela, Costa Rica, 2018 – 2019.

Table 3. Characteristics of precipitation events based on the three categories of rain sheets (L: <20 mm; M: 20-40 mm and H:> 40 mm) by events and numbers of events. Entisol soil in a shaded coffee (*Coffea arabica*) plantation. Llano Brenes, Alajuela, Costa Rica, 2018 – 2019.

	Categoría de evento	2018				2019			
		Precipitación (mm)	% Precipitación con respecto al total (% mm)	Número de eventos	% Eventos con respecto del total	Precipitación (mm)	% Precipitación con respecto al total (% mm)	Número de eventos	% Eventos con respecto del total
Mayo	L	14,1	1,3	1,0	2,6	31,4	3,3	3,0	7,7
	M	149,5	13,8	5,0	12,8	99,5	10,4	3,0	7,7
	H	258,1	23,8	4,0	10,3	174,6	18,3	3,0	7,7
Junio	L	10,6	1,0	2,0	5,1	77,8	8,1	6,0	15,4
	M	25,4	2,3	1,0	2,6	67,9	7,1	2,0	5,1
	H	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Julio	L	14,7	1,4	1,0	2,6	45,9	4,8	4,0	10,3
	M	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	H	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Agosto	L	41,1	3,8	4,0	10,3	42,9	4,5	5,0	12,8
	M	59,2	5,5	2,0	5,1	28,2	3,0	1,0	2,6
	H	0,0	0,0	0,0	0,0	107,4	11,2	1,0	2,6
Septiembre	L	72,0	6,6	7,0	17,9	23,2	2,4	2,0	5,1
	M	35,3	3,3	1,0	2,6	69,6	7,3	2,0	5,1
	H	123,1	11,3	2,0	5,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Octubre	L	39,8	3,7	4,0	10,3	10,8	1,1	1,0	2,6
	M	49,6	4,6	2,0	5,1	78,8	8,3	3,0	7,7
	H	188,4	17,4	2,0	5,1	69,6	7,3	1,0	2,6
Noviembre	L	4,8	0,4	1,0	2,6	6,6	0,7	1,0	2,6
	M	0,0	0,0	0,0	0,0	20,8	2,2	1,0	2,6
	H	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mayo a noviembre	L	197,1	18,2	20,0	51,3	238,6	25,0	22,0	56,4
	M	318,9	29,4	11,0	28,2	364,8	38,2	12,0	30,8
	H	569,6	52,5	8,0	20,5	351,6	36,8	5,0	12,8

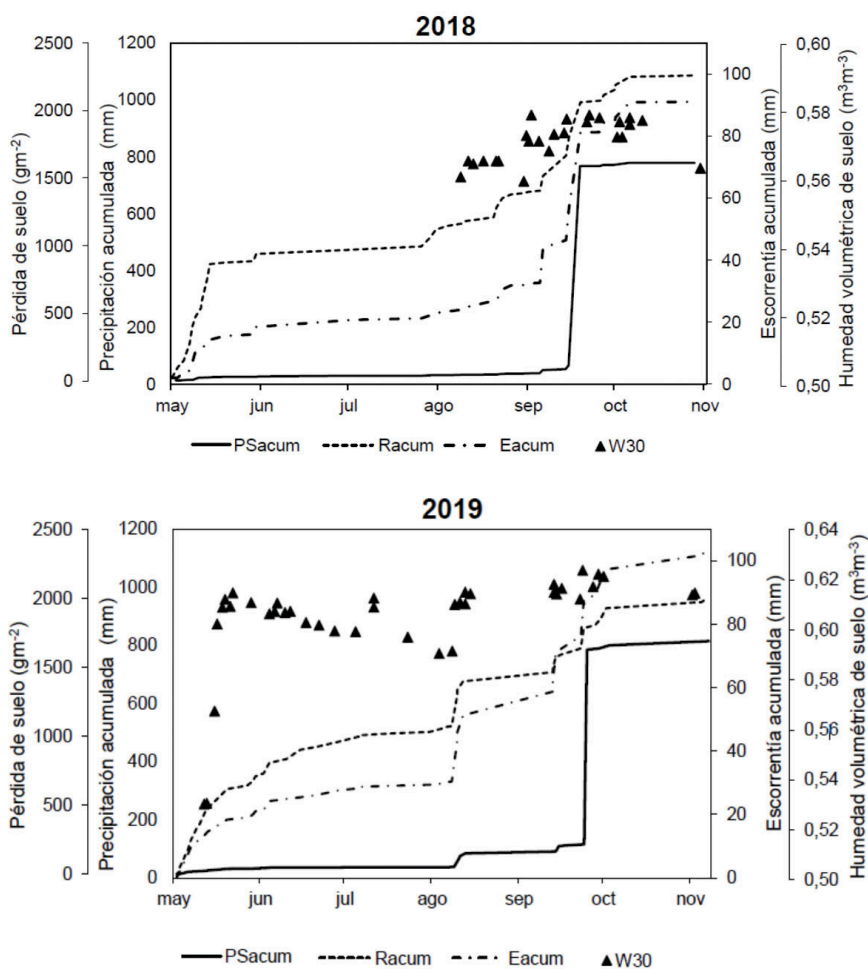


Figura 3. Precipitación acumulada (mm), escorrentía (mm), pérdida de suelo (g m^{-2}) y contenido de humedad de suelo a 0,3 m de profundidad por evento de lluvia. Suelo Entisol en una plantación de café (*Coffea arabica*) con sombra. Llano Brenes, Alajuela, Costa Rica, 2018 – 2019.

PSacum: pérdida de suelo acumulada; Racum: lluvia acumulada; Eacum: escorrentía acumulada; W30: contenido de agua del suelo.

Figure 3. Cumulative rainfall (mm), runoff (mm), soil erosion (g m^{-2}), and soil water content at a depth of 0,3 m per rain event. Entisol soil in a shaded coffee (*Coffea arabica*) plantation. Llano Brenes, Alajuela, Costa Rica, 2018 – 2019.

PSacum: cumulative soil loss; Racum: cumulative rainfall; Eacum: cumulative runoff; W30: soil water content.

Relación entre la escorrentía, la erosión y las variables explicativas a escala inter-evento

La base de datos no pasó la prueba de distribución normal (Shapiro Wilks), por lo que se utilizó una correlación de Spearman para los datos de los dos años de eventos (Cuadro 4). Se excluyeron quince eventos del 2018, puesto que no se disponía de los datos de contenido de agua del suelo para ese período.

La escorrentía estuvo altamente correlacionada con las características de la precipitación (cantidad, intensidad de lluvia máxima a 30 min e intensidad de lluvia promedio), donde esta última tuvo la más fuerte correlación ($R=0,79$ y $p<0,001$). Se presentó una correlación moderada significativa entre la escorrentía y el contenido de

Cuadro 4. Coeficientes de la correlación de Spearman. Los datos provienen de las parcelas promediadas entre el 2018 y 2019. Suelo Entisol en una plantación de café (*Coffea arabica*) con sombra. Llano Brenes, Alajuela, Costa Rica, 2018 – 2019.

Table 4. Spearman's correlation coefficients. The data comes from averaged plots between 2018 and 2019. Entisol soil in a shaded coffee (*Coffea arabica*) plantation. Llano Brenes, Alajuela, Costa Rica, 2018 – 2019.

n: 64	Lámina de escorrentía (mm)	Concentración de sedimentos (g L ⁻¹)	Pérdida de suelo (g m ⁻²)	Precipitación (mm)	Duración de lluvia (min)	Intensidad de lluvia máx a 30 min (mm h ⁻¹)	Intensidad de lluvia promedio máx (mm h ⁻¹)	Contenido de agua del suelo (m ³ m ⁻³)	Cobertura vegetal (%)	Índice de cobertura del café
Lámina de escorrentía (mm)	1,00									
Concentración de sedimentos (g L ⁻¹)	0,38 [#]	1,00								
Pérdida de suelo (g m ⁻²)	0,91*	0,67*	1,00							
Precipitación (mm)	0,79*	0,19	0,69*	1,00						
Duración de lluvia (min)	0,19	-0,07	0,12	0,40*	1,00					
Intensidad de lluvia máx a 30 min (mm h ⁻¹)	0,70*	0,22	0,64*	0,80*	-0,02	1,00				
Intensidad de lluvia promedio máx (mm h ⁻¹)	0,61*	0,25	0,58*	0,69*	-0,32 [#]	0,85*	1,00			
Contenido de agua del suelo (m ³ m ⁻³)	0,42*	0,24	0,43*	0,20	0,02	0,18	0,17	1,00		
Cobertura vegetal (%)	0,22	0,40*	0,33 [#]	0,04	0,14	-0,03	-0,08	-0,01	1,00	
Índice de cobertura del café	0,15	0,35 [#]	0,28 ⁺	-0,06	-0,33 [#]	0,17	0,19	0,20	0,48*	1,00

+, # y *: p<0,05, <0,01 y <0,001, respectivamente. / +, # y *: p<0,05, <0,01 y <0,001 respectively.

agua del suelo (R=0,42 y p<0,001). La correlación entre la escorrentía y la pérdida de suelo fue muy significativa (R=0,91 y p<0,001).

La concentración de sedimentos presentó una significativa y alta correlación con respecto a la pérdida de suelo (R=0,67 y p<0,001). Las variables cobertura vegetal e índice de cobertura del café presentaron una correlación significativa (R=0,40 y p<0,001; R=0,35 y p<0,01, respectivamente) con la concentración de sedimentos. Los datos de cobertura vegetal presentan una correlación moderada y significativa con los valores de índice de cobertura del café (R=0,48 y p<0,001).

La pérdida de suelo se encontró alta y significativamente correlacionada con la precipitación (R=0,69 y p<0,001). Las correlaciones con la intensidad de lluvia máxima a 30 min e intensidad de lluvia promedio fueron también significativas (R=0,64 y R=0,58, respectivamente, p<0,001). Ocurrió una moderada correlación entre la pérdida de suelo y el contenido de agua del suelo (R=0,43 y p<0,01).

La precipitación tuvo una alta y significativa correlación con la intensidad de lluvia máxima a 30 min e intensidad de lluvia promedio (R=0,80 y R=0,69, respectivamente, p<0,001), puesto que son variables relacionadas. La correlación con la duración de lluvia fue moderada y significativa (R=0,40 y p<0,001).

Se elaboró un gráfico de dispersión entre la lámina de lluvia y el total de escorrentía por evento (Figura 4). Debido a la correlación moderada del contenido de humedad volumétrica del suelo con la escorrentía, los datos

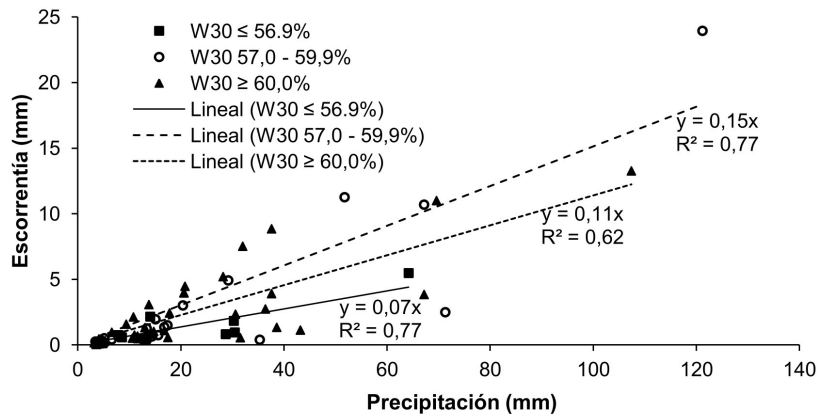


Figura 4. Gráfico de dispersión y líneas de regresión con el mejor ajuste de la escorrentía explicada por la precipitación en tres diferentes contenidos de agua como condición inicial. Suelo Entisol en una plantación de café (*Coffea arabica*) con sombra. Llano Brenes, Alajuela, Costa Rica, 2018 – 2019.

W30: contenido de agua del suelo.

Figure 4. Scatter plot and best fitting regression lines of the runoff explained by rainfall on three different soil water contents as the initial condition. Entisol soil in a shaded coffee (*Coffea arabica*) plantation. Llano Brenes, Alajuela, Costa Rica, 2018 – 2019.

W30: soil water content.

fueron divididos en función de la humedad. Las curvas de ajuste fueron lineales y se observó un buen ajuste que mejoró el coeficiente de determinación ($R = 0,68$ cuando no se realizó ninguna separación de la humedad del suelo).

La generación de escorrentía fue menor en los eventos en los cuales la humedad inicial del suelo fue menor a 56,9 %. La escorrentía incrementó conforme aumentó el contenido de humedad inicial, por lo que los mayores registros de escorrentía se presentaron con una humedad superior a 60,0 %, lo que es consistente con el aumento de la constante en los modelos de ajuste. El 45,7 % de la escorrentía total medida en los dos años corresponde a eventos con una lámina de lluvia >40 mm. Estos eventos extremos tienen un importante rol en la escorrentía y pérdida de suelo. Además de la precipitación, el contenido de agua del suelo contribuyó a la variabilidad en la escorrentía y pérdida de suelo.

Análisis de datos intra-evento

El modelo de infiltración fue optimizado con el ajuste de los parámetros f_o y f_c . La diferencia entre el contenido de humedad a capacidad de campo y del punto de marchitez permanente fue del 15 % y se consideró 0,30 m como la capa superficial del suelo. Por lo que S_m se ajustó en 45 mm (15 % x 0,30 m). Se realizaron varias corridas de optimización para la calibración, los valores de f_o y f_c que minimizaron la suma absoluta de los errores fueron 26,65 y 19,08 mm h^{-1} , respectivamente. Se escogieron en forma aleatoria once eventos para la calibración, los cuales sumaron 68,75 mm h^{-1} de escorrentía observada y 71,86 mm h^{-1} de escorrentía estimada (3,11 mm de error).

Para la validación se seleccionaron diez eventos que sumaron tanto en la escorrentía observada como en la estimada 65,93 mm h^{-1} (0 mm de error). El modelo de infiltración proporcionó una estimación aceptable de los valores totales de escorrentía. Se elaboraron hietogramas para graficar la escorrentía observada y estimada, además de la precipitación y capacidad de infiltración. La Figura 5 representa un evento sucedido el 18 de mayo de 2019.

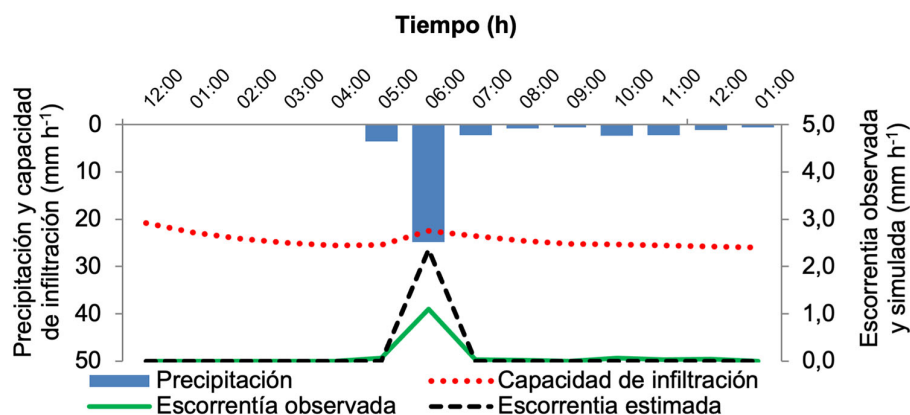


Figura 5. Hietograma de un evento (como ejemplo) de lluvia del 18 de mayo de 2019. Suelo Entisol en una plantación de café (*Coffea arabica*) con sombra. Llano Brenes, Alajuela, Costa Rica, 2018 – 2019.

Figure 5. Hyetograph of a rainfall event (as an example) on May 18th, 2019. Entisol soil in a shaded coffee (*Coffea arabica*) plantation. Llano Brenes, Alajuela, Costa Rica, 2018 – 2019.

Los veintiún eventos observados y estimados fueron clasificados en ocho grupos de clase de lámina de escorrentía (<2, 2-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30 y >30 mm de escorrentía), de acuerdo con los datos de frecuencia (Figura 6). Las clases de los valores estimados no tuvieron una distribución acumulada similar a los valores observados en algunos grupos. En algunos eventos el modelo subestimó la escorrentía convirtiéndola en cero.

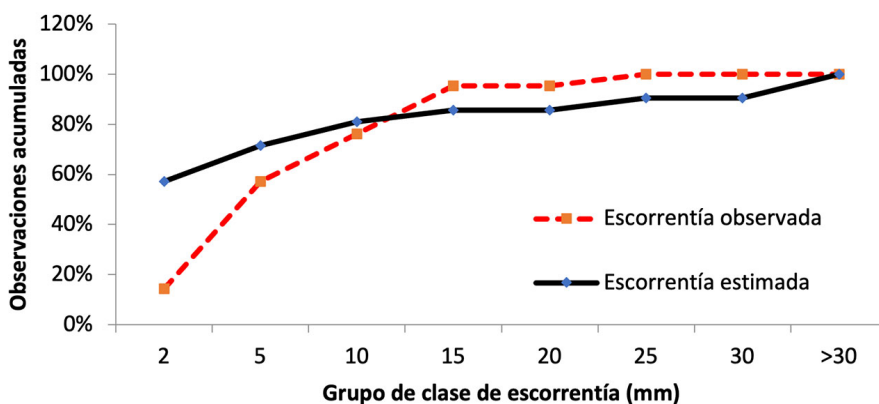


Figura 6. Porcentaje acumulado de los eventos de escorrentía observada y simulada clasificada por categoría de evento de la lámina total de escorrentía (mm). Suelo Entisol en una plantación de café (*Coffea arabica*) con sombra. Llano Brenes, Alajuela, Costa Rica, 2018 – 2019.

Figure 6. Cumulative percentage of observed and simulated runoff events classified by total runoff depth event category (mm). Entisol soil in a shaded coffee (*Coffea arabica*) plantation. Llano Brenes, Alajuela, Costa Rica, 2018 – 2019.

Discusión

El análisis a escala mensual-anual determinó que la escorrentía medida en este estudio en cada temporada lluviosa fue de $91,0 \pm 0,8$ mm en el 2018 y $102,7 \pm 0,9$ mm en el 2019. Diferentes estudios presentaron rangos variables obtenidos en mediciones de campo, como por ejemplo Villatoro-Sánchez et al. (2015), reportaron mediciones de 103, 54 y 33 mm de escorrentía en tres temporadas lluviosas en cultivos de café con sombra en 60 a 70 % de pendiente. Otro ejemplo fue el de Vahrson y Cervantes (1991), quienes midieron 27,9 mm de escorrentía en una temporada lluviosa. Los resultados obtenidos en el presente estudio fueron similares a los medidos por Ataroff y Monasterio (1997), cuyos resultados fueron de 87 y 97 mm de escorrentía en dos temporadas lluviosas en cultivos de café bajo sombra con 60 % de pendiente.

La pérdida de suelo anual fue de 1612 y 1692 g m⁻² para 2018 y 2019, respectivamente, lo cual es considerado como moderado de acuerdo con la escala de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1979). En general, la pérdida de suelo depende de muchos factores tales como la pendiente, el tipo de suelo y su profundidad efectiva, la cobertura vegetal, las características de la lluvia, la humedad del suelo y el manejo del suelo, entre otros. Un estudio realizado en un Entisol en México bajo cultivos de maíz, reportó diferentes pérdidas de suelo anuales con distintos manejos (entre 559 g m⁻² a 99 666 g m⁻²) (Uribe-Gómez et al., 2002). Para cultivos de café, los valores también difieren, Ataroff y Monasterio (1997) en Venezuela reportaron una pérdida de suelo anual entre 39 y 662 g m⁻²; mientras que en otro estudio realizado en Indonesia bajo diferentes tratamientos se encontraron valores anuales entre 200 y 890 g m⁻² (Iijima et al., 2003).

La pérdida de suelo anual observada en este estudio dependió en gran medida a la concentración de sedimentos ($2,14 \pm 1,17$ g L⁻¹ en el 2018 y $1,88 \pm 1,34$ g L⁻¹ en el 2019), ya que se obtuvieron valores un poco más altos que los reportados en algunos estudios de parcelas de escorrentía en café con sombra (Bermúdez Méndez, 1980; Villatoro-Sánchez et al., 2015). Sin embargo, estos valores fueron bajos en comparación con los valores reportados por Presbitero et al. (1995) en pendientes entre el 50 y 70 %. El volumen de escorrentía fue otro factor relacionado con la pérdida de suelo en este estudio, debido a que fue utilizado para su estimación. Las correlaciones entre la concentración de sedimentos y las características de la precipitación fueron bajas, lo cual coincidió con lo indicado por Villatoro-Sánchez et al. (2015) y se contrapuso con lo indicado por Assouline y Ben-Hur (2006) bajo un estudio de lluvia simulada. La cobertura vegetal y el índice de cobertura del café presentaron una correlación baja con respecto a la concentración de sedimentos. La deposición de sedimentos pudo verse explicada por la densidad del café en el sitio de estudio, ya que esta fue de 3330 plantas por hectárea, cerca de la mitad de las reportadas por Villatoro-Sánchez et al. (2015). Esto en comparación con la densidad promedio para zonas cafetaleras en Costa Rica, la cual ronda las 5000 plantas por hectárea.

En el análisis a escala inter-evento, pese a que mayo fue el mes que registró la mayor precipitación, los más altos valores de escorrentía y de pérdida de suelo se registraron en octubre de cada año, cuando los valores de contenido de agua inicial en el suelo tuvieron un incremento. Tanto la escorrentía como la pérdida de suelo presentaron un patrón estacional, con períodos críticos desde septiembre y octubre en el 2018, mientras que en el 2019 fue desde agosto a octubre. La dinámica de la pérdida de suelo siguió la dinámica de la escorrentía, la cual estuvo influenciada por la dinámica de la precipitación y del contenido de agua del suelo, similar a lo indicado por Villatoro-Sánchez et al. (2015). El incremento de humedad en el suelo es de esperar conforme las lluvias se hacen más seguidas en el tiempo durante la temporada. Por tanto, la dinámica de erosión con la pérdida de suelo empieza a ser más compleja, no solo propiedades de la lluvia entran en juego, también condiciones del suelo como la humedad y la cobertura, que adquieren más relevancia, de ahí que los modelos de ajuste entre pérdida de suelo y precipitación no logren ajustarse y sea variable de acuerdo con el momento de la época lluviosa.

Si bien la precipitación presentó una alta correlación con la escorrentía y con la pérdida de suelo (Verbist et al., 2010), la intensidad promedio de la lluvia (Vahrson & Cervantes, 1991) y la intensidad de lluvia máxima a 30 min (Caiqiong & Jun, 2016; Mohamadi & Kavian, 2015) tuvieron una alta y significativa correlación con la pérdida de suelo y la escorrentía, lo cual indicó que tanto la escorrentía como la pérdida de suelo se encontraron influenciados por los cambios en las intensidades de la lluvia.

El contenido de humedad inicial del suelo es un factor importante que afecta la infiltración del agua en el suelo, la escorrentía y la erosión (Gao et al., 2011). Esta variable presentó una correlación moderada con la escorrentía y la pérdida de suelo. La escorrentía y la pérdida de suelo variaron con la estación lluviosa y con el contenido inicial de agua en el suelo. Las mayores cantidades de escorrentía y pérdida de suelo se registraron en la fase de excedente de agua del suelo (temporada de lluvias), por lo que la escorrentía generada por la humedad inicial del suelo pudo ser relevante en temporada lluviosa, similar a lo concluido por Caiqiong y Jun (2016).

En el presente trabajo se utilizó el modelo Diskin y Nazimov para determinar si los patrones de lluvia intra-evento y el contenido de agua del suelo explicaban mejor la escorrentía que los datos inter-evento. Este modelo utilizó el contenido de agua del suelo al comienzo de un evento de precipitación con una lámina de lluvia por cada hora, para simular la dinámica de los efectos de infiltración en el suelo. La intensidad de precipitación y la humedad inicial del suelo permitieron explicar la generación de escorrentía para el total de los veintidós eventos en la escala intra-evento. Sin embargo, en las intra-precipitaciones se presentaron subestimaciones, ya que las de baja precipitación (menores a 3 mm), fueron estimadas sin escorrentía. El que no se haya registrado escorrentía durante eventos de lluvia de baja lámina, se pudo explicar por el efecto de intercepción de lluvia de parte del cultivo de café y de la misma cobertura del suelo. Además, el suelo tiene una capacidad de absorber el agua de lluvia en forma eficiente sin que se desarrolle escorrentía, lo cual se refleja en la capacidad de infiltración inicial del modelo y el estado de humedad en el suelo.

Los resultados obtenidos en la estimación de escorrentía con el modelo Diskin y Nazimov, presentaron un ajuste aceptable tanto en la calibración con 71,86 mm h⁻¹ (3,11 mm de error), así como en la validación con 65,93 mm h⁻¹ (0 mm de error), para el total de eventos. Sin embargo, a nivel individual de eventos, no siempre se ajustaron bien, debido a que la mitad de los eventos se estimaron sin escorrentía y no se presentó un patrón determinado entre las estimaciones y la intensidad de precipitación. Esto se contradice con lo obtenido en el estudio de Villatoro-Sánchez et al. (2015), en el que se estableció que el patrón de la intensidad de precipitación explicó mejor la escorrentía a escala intra-evento que las correlaciones obtenidas en la escala inter-evento. En el presente estudio, las correlaciones entre la intensidad de precipitación con la escorrentía y pérdida de suelo fueron altas en la escala inter-evento.

Conclusiones

Hubo una tasa de erosión media anual de 1652 g m⁻², producto de una concentración de sedimentos de 2,01 g L⁻¹ y una escorrentía media anual de 96,8 mm, en parcelas de 80 m² con un área inclinada de entre 65,23 a 71,55 %. La escorrentía superficial, así como la pérdida de suelo presentaron un fuerte patrón estacional con valores máximos en el mes de octubre de cada año.

En el análisis inter-evento se mostró como la precipitación anual (1020,5 mm) y sus intensidades tuvieron un importante rol en la generación de escorrentía y pérdida de suelo. El contenido de humedad inicial del suelo fue un importante factor para explicar el comportamiento de la escorrentía. La generación de sedimentos puede explicarse por la baja densidad de siembra del café (3330 plantas por hectárea).

El modelo Diskin y Nazimov utilizado en el análisis intra-evento ayudó a demostrar que la dinámica de la humedad y sus propiedades físicas de capacidad de infiltración en el suelo, tuvieron una alta participación en la generación de escorrentía para el total de eventos lluviosos.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación del Ecuador (SENESCYT), a la Comisión Asesora sobre Degradación de Tierras (CADETI) del Ministerio de Agricultura de Costa Rica y al Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica por el aporte financiero y logístico; a la Unidad de Manejo de Información de la Gerencia Técnica del Instituto del Café de Costa Rica (ICAFE) por proveer datos meteorológicos; y a José Jiménez (†) por su colaboración en la instalación de los equipos y por permitir realizar el presente trabajo en su finca.

Referencias

- Alcázar Torralba, M. A. (2013). *Evaluación de la erosión hídrica en parcelas experimentales en campos agrícolas de secano mediterráneo* [Tesis de Doctorado, Universidad Complutense de Madrid]. Repositorio Institucional de la Universidad Complutense de Madrid. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/23546/>
- Amundson, R., Berhe, A. A., Hopmans, J. W., Olson, C., Sztein, A. E., & Sparks, D. L. (2015). Soil and human security in the 21st century. *Science*, *348*(6235), Article 1261071. <https://doi.org/10.1126/science.1261071>
- Anache, J. A. A., Wendland, E. C., Oliveira, P. T. S., Flanagan, D. C., & Nearing, M. A. (2017). Runoff and soil erosion plot-scale studies under natural rainfall: A meta-analysis of the Brazilian experience. *CATENA*, *152*, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.003>
- Assouline, S., & Ben-Hur, M. (2006). Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing. *CATENA*, *66*(3), 211–220. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.02.005>
- Ataroff, M., & Monasterio, M. (1997). Soil erosion under different management of coffee plantations in the Venezuelan Andes. *Soil Technology*, *11*(1), 95–108. [https://doi.org/10.1016/S0933-3630\(96\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0933-3630(96)00118-3)
- Bagarello, V., & Ferro, V. (1998). Calibrating storage tanks for soil erosion measurement from plots. *Earth Surface Processes and Landforms*, *23*(13), 1151–1170. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199812\)23:13<1151::AID-ESP929>3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199812)23:13<1151::AID-ESP929>3.0.CO;2-7)
- Bermúdez Méndez, M. M. (1980). *Erosión hídrica y escorrentía superficial en el sistema de café (Coffea arabica L.), poró (Erythrina poeppigiana (Walpers) O. Flook) y laurel (Cordia alliodora R. & P.) Cham en Turrialba, Costa Rica* [Tesis de Maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. Repositorio del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/4958>
- Blanco-Canqui, H., & Lal, R. (2010). Soil and water conservation. In H. Blanco-Canqui, & R. Lal (Eds.), *Principles of Soil Conservation and Management* (pp. 1–19). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8709-7_1
- Caiqiong, Y., & Jun, F. (2016). Application of HYDRUS-1D model to provide antecedent soil water contents for analysis of runoff and soil erosion from a slope on the Loess Plateau. *CATENA*, *139*, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.11.017>
- Campbell Sci. (2020). *CS616 and CS625 Water content reflectometers*. Campbell Scientific, Inc.
- Cannavo, P., Sansoulet, J., Harmand, J.-M., Siles, P., Dreyer, E., & Vaast, P. (2011). Agroforestry associating coffee and Inga densiflora results in complementarity for water uptake and decreases deep drainage in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *140*(1–2), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.11.005>

- Chen, H., Zhang, X., Abla, M., Lü, D., Yan, R., Ren, Q., Ren, Z., Yang, Y., Zhao, W., Lin, P., Liu, B., & Yang, X. (2018). Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China. *CATENA*, 170, 141–149. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.06.006>
- Damnati, B., Ibrahim, S., & Radakovitch, O. (2013). Quantifying erosion using ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb in cultivated soils in three Mediterranean watersheds: Synthesis study from El Hachef, Raouz and Nakhla (North West Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 79, 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2012.10.006>
- Diskin, M. H., & Nazimov, N. (1995). Linear reservoir with feedback regulated inlet as a model for the infiltration process. *Journal of Hydrology*, 172(1–4), 313–330. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02709-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02709-X)
- Dong, Y., Xiong, D., Su, Z. A., Yang, D., Zheng, X., Shi, L., & Poesen, J. (2018). Effects of vegetation buffer strips on concentrated flow hydraulics and gully bed erosion based on *in situ* scouring experiments. *Land Degradation & Development*, 29(6), 1672–1682. <https://doi.org/10.1002/ldr.2943>
- Eswaran, H., Lal, R., & Reich, P. (2001). Land degradation: An overview. In E. M. Bridges, I. D. Hannam, L. R. Oldeman, F. W. T. Pening de Vries, S. J. Scherr, & S. Sombatpanit (Eds.), *Response to land degradation* (pp. 20–35). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429187957-4>
- Fang, N. F., Wang, L., & Shi, Z. H. (2017). Runoff and soil erosion of field plots in a subtropical mountainous region of China. *Journal of Hydrology*, 552, 387–395. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.048>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1979). *A provisional methodology for soil degradation assessment*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fortugno, D., Boix-Fayos, C., Bombino, G., Denisi, P., Rubio, J. M. Q., Tamburino, V., & Zema, D. A. (2017). Adjustments in channel morphology due to land-use changes and check dam installation in mountain torrents of Calabria (southern Italy). *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(14), 2469–2483. <https://doi.org/10.1002/esp.4197>
- Gao, X., Wu, P., Zhao, X., Shi, Y., Wang, J., & Zhang, B. (2011). Soil moisture variability along transects over a well-developed gully in the Loess Plateau, China. *CATENA*, 87(3), 357–367. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.07.004>
- García-Ruiz, J. M., Beguería, S., Nadal-Romero, E., González-Hidalgo, J. C., Lana-Renault, N., & Sanjuán, Y. (2015). A meta-analysis of soil erosion rates across the world. *Geomorphology*, 239, 160–173. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.008>
- Ghahramani, A., & Ishikawa, Y. (2013). Water flux and sediment transport within a forested landscape: The role of connectivity, subsurface flow, and slope length scale on transport mechanism. *Hydrological Processes*, 27(26), 4091–4102. <https://doi.org/10.1002/hyp.9791>
- Gómez, J. A., Llewellyn, C., Basch, G., Sutton, P. B., Dyson, J. S., & Jones, C. A. (2011). The effects of cover crops and conventional tillage on soil and runoff loss in vineyards and olive groves in several Mediterranean countries. *Soil Use and Management*, 27(4), 502–514. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00367.x>
- Gómez-Delgado, F., Rouspard, O., le Maire, G., Taugourdeau, S., Pérez, A., van Oijen, M., Vaast, P., Rapidel, B., Harmand, J. M., Voltz, M., Bonnefond, J. M., Imbach, P., & Moussa, R. (2011). Modelling the hydrological behaviour of a coffee agroforestry basin in Costa Rica. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(1), 369–392. <https://doi.org/10.5194/hess-15-369-2011>

- Iijima, M., Izumi, Y., Yuliadi, E., Sunyoto, Afandi, & Utomo, M. (2003). Erosion control on a steep sloped coffee field in Indonesia with alley cropping, intercropped vegetables, and no-tillage. *Plant Production Science*, 6(3), 224–229. <https://doi.org/10.1626/pp.s.6.224>
- Instituto del Café de Costa Rica. (2020). *Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica*. <https://n9.cl/ugsp>
- Khan, M. A., Kakar, E., Baloch, D. M., & Azad, S. U. D. (2011). Calibration of time domain reflectometry (TDR) soil moisture point probe for two soils. *Journal of Applied and Emerging Sciences*, 2(1), 19–26.
- Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*, 12(6), 519–539. <https://doi.org/10.1002/ldr.472>
- Luk, S. (1985). Effect of antecedent soil moisture content on rainwash erosion. *CATENA*, 12(1), 129–139. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(85\)80012-6](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(85)80012-6)
- Maetens, W., Poesen, J., & Vanmaercke, M. (2012). How effective are soil conservation techniques in reducing plot runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean? *Earth-Science Reviews*, 115(1–2), 21–36. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.08.003>
- Mohamadi, M. A., & Kavian, A. (2015). Effects of rainfall patterns on runoff and soil erosion in field plots. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(4), 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.10.001>
- Molina Campos, E. (2015). *Determinación y cuantificación de la tasa de erosión laminar en cafetales ubicados en la cuenca del Río Jesús María* [Tesis de Grado, Universidad de Costa Rica]. Repositorio SIBDI de la Universidad de Costa Rica. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/xmlui/handle/123456789/16449>
- Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(33), 13268–13272. <https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104>
- Naranjo, M. E., & Ataroff, M. (2015). Calibración de equipos TDR para su uso en suelos no disturbados. *Interciencia*, 40(6), 416–422. <https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2017/10/416-c-NARANJO.pdf>
- Pimentel, D., Terhune, E. C., Dyson-Hudson, R., Rochereau, S., Samis, R., Smith, E. A., Denman, D., Reifschneider, D., & Shepard, M. (1976). Land Degradation: effects on food and energy resources. *Science*, 194(4261), 149–155. <http://www.jstor.org/stable/1742661>
- Presbitero, A. L., Escalante, M. C., Rose, C. W., Coughlan, K. J., & Ciesiolka, C. A. (1995). Erodibility evaluation and the effect of land management practices on soil erosion from steep slopes in Leyte, the Philippines. *Soil Technology*, 8(3), 205–213. [https://doi.org/10.1016/0933-3630\(95\)00020-8](https://doi.org/10.1016/0933-3630(95)00020-8)
- R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil Taxonomy*. United States Department of Agriculture. <https://bit.ly/2AhEErb>
- Uribe-Gómez, S., Francisco-Nicolás, N., & Turrent-Fernández, A. (2002). Pérdida de suelo y nutrientes en un entisol con prácticas de conservación en los Tuxtlas, Veracruz, México. *Agrociencia*, 36(2), 161–168. <https://www.agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/170>
- Vahrson, W., & Cervantes, C. (1991). Tasas de escorrentía superficial y erosión laminar en Puriscal, Costa Rica. *Turrialba*, 41(3), 396–402. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/10256>
- 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(1–4), 1–23. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00020-3)

- Verbist, B., Poesen, J., van Noordwijk, M., Widiyanto, Suprayogo, D., Agus, F., & Deckers, J. (2010). Factors affecting soil loss at plot scale and sediment yield at catchment scale in a tropical volcanic agroforestry landscape. *CATENA*, *80*(1), 34–46. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.08.007>
- Verheijen, F. G. A., Jones, R. J. A., Rickson, R. J., & Smith, C. J. (2009). Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Reviews*, *94*(1–4), 23–38. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.02.003>
- Villatoro-Sánchez, M., Le Bissonnais, Y., Moussa, R., & Rapidel, B. (2015). Temporal dynamics of runoff and soil loss on a plot scale under a coffee plantation on steep soil (Ultisol), Costa Rica. *Journal of Hydrology*, *523*, 409–426. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.058>
- Wischmeier, W. H. (1959). A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. *Soil Science Society of America Journal*, *23*(3), 246–249. <https://doi.org/10.2136/sssaj1959.03615995002300030027x>
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- Wuepper, D., Borrelli, P., & Finger, R. (2020). Countries and the global rate of soil erosion. *Nature Sustainability*, *3*, 51–55. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0438-4>
- Xiong, M., Sun, R., & Chen, L. (2019). A global comparison of soil erosion associated with land use and climate type. *Geoderma*, *343*, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.013>
- Yao, J., Cheng, J., Zhou, Z., Sun, L., & Zhang, H. (2018). Effects of herbaceous vegetation coverage and rainfall intensity on splash characteristics in northern China. *CATENA*, *167*, 411–421. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.05.019>