

Determinación de velocidad de infiltración básica en tres áreas de ladera: Roldanillo, Dagua y Pradera en Valle del Cauca, Colombia

Determination of basic infiltration speed in three areas of the hills around Roldanillo, Dagua and Pradera in Valle del Cauca, Colombia

Victoria Estefanía Ruiz Molina ^{1,2}, Carlos Germán Muñoz Perea ^{1,3}.

¹Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira. Palmira, Colombia. ²  veruizm@unal.edu.co, ³  cgmunozp@unal.edu.co



<https://doi.org/10.15446/acag.v71n2.83572>

2022 | 71-2 p 130-138 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2019-11-16 Acep.: 2022-12-07

Resumen

La velocidad de infiltración básica (*Vib*) es un parámetro importante para planificar sistemas de irrigación; sin embargo, este parámetro se desconoce en la mayoría de suelos de ladera del Valle del Cauca, Colombia. Por tal razón, el objetivo de esta investigación fue determinar la *Vib* en tres zonas de ladera usando una nueva adaptación de goteros tipo Mariotte de bajo volumen de trabajo, a partir del área mojada y el caudal del gotero diseñado. La experimentación se desarrolló en tres zonas de ladera de Roldanillo, Dagua y Pradera en el Valle del Cauca, en cultivos de aguacate Hass, piña MD-2 y mora, respectivamente. Los suelos se clasificaron en: franco-limoso, arcilloso y arcillo-limoso, respectivamente. Se aplicaron láminas de agua de 2, 3, 3.5 y 4 litros usando el principio de gotero Mariotte y se distribuyeron a partir de un diseño completo al azar en cada finca. Se obtuvo el área mojada (*Am*) de cada una de las láminas aplicadas usando un *software* de procesamiento de imágenes. Se encontró que la longitud del diámetro de humedecimiento tiende a estabilizarse a partir de 2.26 litros a +/- 20 cm de profundidad, por lo que se estimaron velocidades de infiltración básica utilizando el modelo empírico de Kostiakov de 38.00 mm hr⁻¹, 1.29 mm hr⁻¹ y 1.40 mm hr⁻¹ para cada zona de estudio. Se comprobó la relación entre el área de humedecimiento y el caudal aplicado por los goteros asociados a la velocidad de infiltración instantánea (*vii*).

Palabras clave: área mojada, gotero Mariotte, modelo Kostiakov, *software* ImageJ, textura del suelo.

Abstract

Basic infiltration speed (*Bis*) is an important parameter in the irrigation system planning. However, this parameter is unknown for the most hill soils of the region of Valle del Cauca, Colombia. For this reason, the objective of this research was to determine the *Bis* in three hill areas measuring the wet area and dripper flow, using a new low volume device based on Mariotte dripper principle. The experiments were carried out in three hill areas of Roldanillo, Dagua and Pradera, (Valle del Cauca), cropped with avocado Hass, pineapple MD-2 and raspberry, respectively. The soil texture was as silt-loam, clay and silty clay, respectively. Water volumes of 2, 3, 3.5 and 4 liters were applied using the Mariotte dripper principle in all soils in a random design in each area. The wetted areas (*Am*) were obtained for each one of the water volumes tested with the free software *ImageJ*. It was found that the length of the wet diameter tends to stabilize between 2.26 liters to a depth of +/- 20 cm; therefore, basic infiltration rates of 38 mm hr⁻¹, 1.29 mm hr⁻¹ and 1.40 mm hr⁻¹ were estimated for each area using the Kostiakov empirical model. It showed the relationship between the wetted area and the flow applied by the drippers associated with the instantaneous infiltration rate.

Keywords: wetted area, Mariotte dropper, Kostiakov model, *ImageJ* software, Soil texture.

Introducción

La infiltración es uno de los fenómenos más importantes en el suelo que se da como resultado de una compleja interacción entre sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Esta dinámica se encuentra supeditada a la estructura y procesos de formación del suelo, e influye en el tamaño de macro, micro y mesoporos (Castellanos-Navarrete *et al.*, 2013). Según Qian, Cheng y Liu (2014) las actividades antrópicas desempeñan un papel importante en el proceso de infiltración, ya que las labores agropecuarias, industriales, la expansión de zonas urbanas, la salinización y sodificación de suelos, la sobreexplotación de mantos freáticos y el transporte de contaminantes, por mencionar algunos, alteran la estructura original de este, acelerando su degradación y afectando variables como la densidad aparente (DA), la conductividad hidráulica, la humedad, la cantidad de agua disponible para raíces y la capacidad de retención y absorción, afectando la velocidad de infiltración (V_i) y la velocidad de infiltración básica (V_{ib}).

A causa de lo anterior, la V_i se posiciona como una variable importante a la hora de analizar el movimiento del agua en el suelo, debido a su efecto en la planificación agropecuaria, industrial y urbana. La V_i se involucra directamente con las propiedades físicas e hidráulicas del suelo (Ali, 2010), y se define como la lámina de agua infiltrada durante un intervalo de tiempo. Usualmente, el movimiento del agua en el suelo se da a partir de un gradiente de concertación en el que intervienen la succión matricial y la succión osmótica, estas están determinadas por el tipo de partícula y el ordenamiento estructural del suelo, así como la presencia de sales y otros compuestos que puedan estar disueltos en el agua del suelo; por lo que, la composición de este en términos de limos, arenas y arcillas establecerá en gran parte cómo se dará el movimiento (Marinhol y Oliviera, 2006).

La V_i está formada por un momento inicial denominado velocidad de infiltración instantánea (v_{ii}) y un movimiento constante llamado velocidad de infiltración básica (V_{ib}). La primera se define por la lámina de agua que penetra al suelo superficial en relación con el tiempo, tendiendo a disminuir a medida que el agua va alcanzando mayor profundidad y volviéndose un proceso constante en relación con la lámina infiltrada vs. el tiempo (V_{ib}), también conocida como capacidad de campo (CC) (Chicas *et al.*, 2014). La importancia de la obtención de la V_{ib} para el sector agrícola reside en que este valor es usado para la proyección, el establecimiento y la producción de cultivos, ya que su adecuada estimación permite implementar sistemas de riego eficientes y eficaces, disminuyendo la pérdida de agua por escorrentía, erosión e inundación, reduciendo el proceso de degradación del suelo (Alvarado-Batres y Barahona-Palomo, 2017; Morbidelli *et al.*, 2017; Flammini *et al.*, 2018; Qian *et al.*, 2018).

Como consecuencia de lo anterior, se han desarrollado diferentes métodos a través de la modelación matemática que permiten comprender y analizar esta variable de estudio. Para esto se han correlacionando las propiedades físicas del suelo, el volumen y el caudal de agua aplicado por el emisor, la topografía del terreno y la medición del área mojada (A_m) del gotero, adecuando el modelo empírico propuesto por Kostiakov para obtener el valor de la V_{ib} (Igboekwe y Adindu, 2014; Morbidelli *et al.*, 2016; Liu, Ma, Hu y Li, 2018). A través de herramientas como el doble anillo infiltrómetro (Delgadillo y Pérez, 2016), lisímetros de pesada (Ávila-Dávila *et al.*, 2019), emisores de riego localizado (goteros) (Cepeda-Rendón, 2008) y goteros tipo Mariotte se ha podido estimar esta variable. Este último se destaca por su facilidad de adecuación a condiciones diversas de terrenos como zonas de ladera, basándose en el principio de bulbo húmedo para analizar el movimiento del agua en el suelo, lo que facilita el aprovechamiento racional del recurso hídrico.

Según lo anterior, el objetivo de este estudio fue determinar la velocidad de infiltración básica (V_{ib}) en tres tipos de suelo de la zona de ladera de los municipios de Roldanillo, Dagua y Pradera, en el departamento del Valle del Cauca, a partir del diseño e implementación de un prototipo ajustado de gotero Mariotte para zonas de trabajo con pendientes altas y medias, relacionando el modelo empírico de infiltración de Kostiakov y calculando el área mojada (A_m) a través de la utilización del *software* de uso libre ImageJ.

Materiales y métodos

Localización. Las zonas de ladera seleccionadas se ubicaron en tres municipios: 1) Roldanillo, vereda La Tulia, finca Bellavista coordenadas 4°24'19" N y 76°13'45" W, a una altitud de 1999 m s. n. m. con temperatura media anual de 18 ° C y precipitación promedio de 1500 mm anuales; 2) Dagua, vereda Villa Hermosa, finca El Encanto, coordenadas 3°37'11.4" N y 76°40'05.9" W a 1220 m s. n. m., temperatura media anual de 32° C y precipitación media anual de 1185mm; 3) Pradera, vereda La Carbonera, finca San Marcos, coordenadas 3°26'11.9" N y 96°09'55" W, altitud de 1999 m s. n. m. con temperatura media anual de 23° C y precipitación media anual de 1225 mm (Figura 1).

Determinación de la textura de los suelos. Se realizó un muestreo en forma de zig-zag por parcela. Se tomaron 10 submuestras de suelo de 200 gr, luego se mezclaron en un recipiente y se hizo una muestra total compuesta de 1 kg siguiendo las directrices de la NTC 4113-2 (ICONTEC, 1997). Posteriormente se enviaron al laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira para determinar su textura por el método de Bouyoucos.

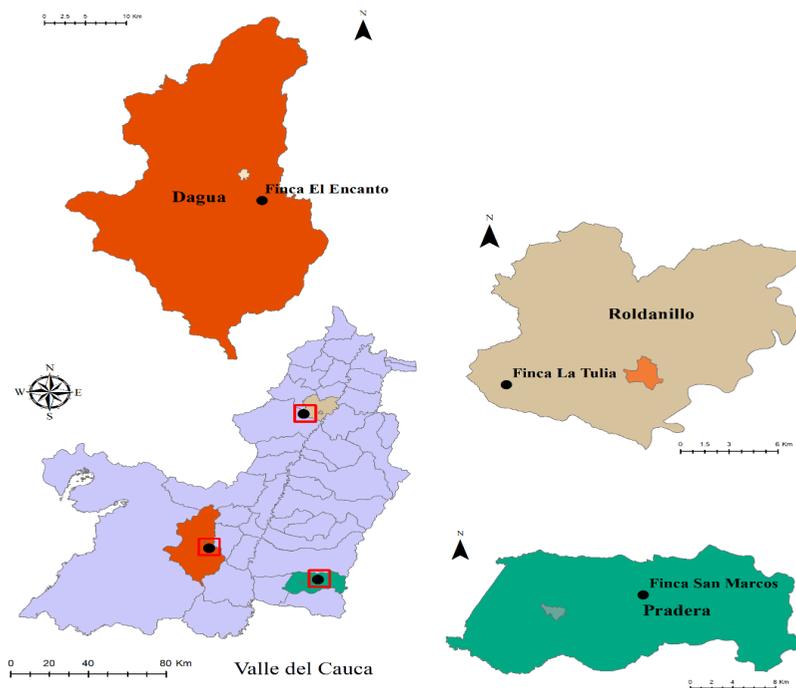


Figura 1. Ubicación espacial de las parcelas de estudio en los municipios de Roldanillo, Dagua y Pradera en el Valle del Cauca.

Diseño y fabricación de goteros tipo Mariotte. Se diseñaron y fabricaron cuatro goteros en material de policloruro de vinilo (PVC) de 3" de diámetro, basados en el principio del frasco de Mariotte citado en Beléndez *et al.*, (2013) de 33, 44, 55 y 66 cm de altura. Las capacidades volumétricas se establecieron en 2, 3, 3.5 y 4 L, tomando volúmenes bajos de trabajo a partir de lo reportado por Mujica, Carmenates y Paneque (2012). Cada gotero se fabricó con una válvula de entrada de aire a 3 cm de altura con respecto al orificio de salida, con un diámetro de 3 mm y una longitud de 8 cm. Los cilindros fueron construidos con una tapa del mismo material con ajuste de rosca. Adicionalmente, se elaboró un soporte metálico en hierro, con alturas graduables de 50 cm de longitud en forma de ángulo recto y terminación en punta para facilitar la inserción en el terreno (Figura 2.F).

Aplicación software ImageJ para cálculo de áreas mojadas (A_m). El muestreo se realizó dentro de las parcelas bajo 3 criterios de selección: facilidad de acceso al sitio, estabilidad del lugar para disposición de los goteros y acceso a un punto de abastecimiento de agua. Se hicieron 3 repeticiones por volúmenes de trabajo con 4 a 5 intervalos de tiempo de 5 minutos según el caso. Se obtuvieron un total 144 aplicaciones, 48 aplicaciones por zona. Los goteros fueron marcados con cintas de colores para distinción de las áreas resultantes en cada uno de los intervalos. Al cilindro de 2 L se le asignó el color rojo, 3 L amarillo, 3.5 L verde y 4 L azul.

Para cada intervalo se tomó una fotografía del área mojada, delimitada por la cinta de color y adicionalmente se ubicó dentro del área delimitada una reglilla de 10 cm de longitud como medida conocida (Aday *et al.*, 2016). Finalmente, se cargaron las imágenes con *software* libre ImageJ y se obtuvo el área mojada (A_m) en m^2 , así como el perímetro mojado (P_m) en m (Valenciano, 2014).

Cálculo de velocidad de infiltración instantánea (vii). Dentro del estudio de la infiltración se han propuesto diferentes modelos y propuestas que se han fundamentado en la ecuación de Darcy (Rodríguez-Vásquez, Aristizábal-Castillo y Camacho-Tamayo, 2008). Estos modelos, principalmente empíricos, se apoyan de una representación analítica del proceso de infiltración a través del tiempo a partir de las experimentaciones en campo (Hernández-Florez, Alba-Triana y Daza-Torrez, 2009). Uno de los modelos empíricos más utilizados es el de Kostiakov (Igboekwe y Adindu, 2014); el cual relaciona la velocidad de infiltración instantánea bajo un modelo potencial;

$$I(t) = ktn^{-1} \quad n < 0 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde, $I(t)$ es la infiltración instantánea con respecto al tiempo; t es el tiempo en minutos; K es la constante que representa la velocidad de infiltración para $T=1$ min; y n es la pendiente de la curva de la velocidad de infiltración acumulada con respecto al

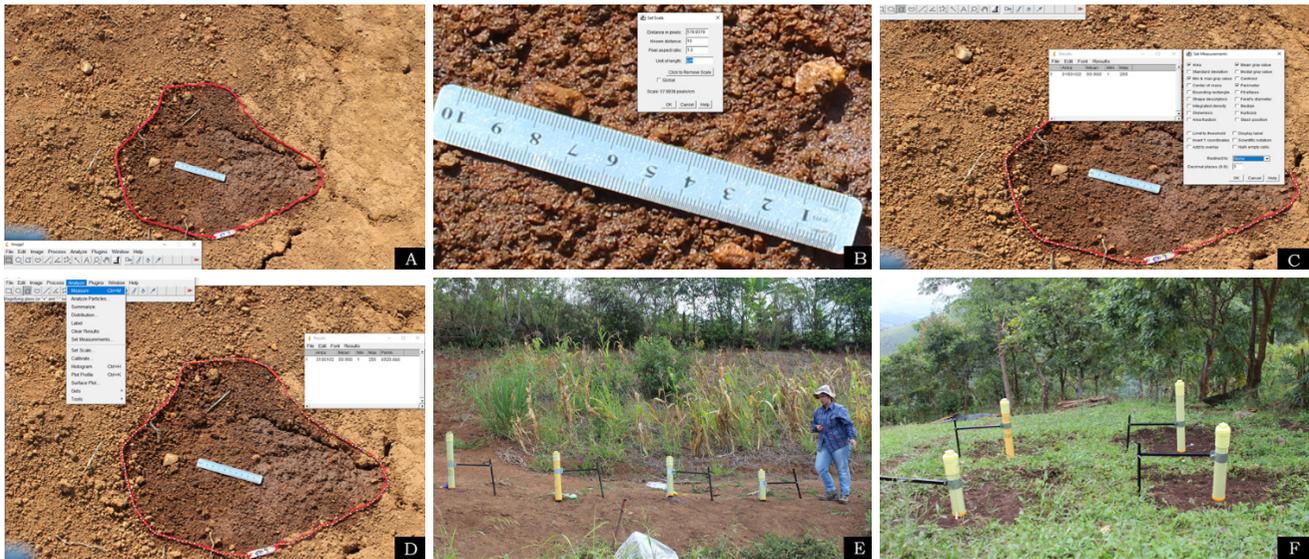


Figura 2. A. Fotografía del Am resultante de la aplicación de agua por medio del gotero Mariotte en el software ImageJ. B. Configuración de la escala en ImageJ a partir de una regilla de 10 cm. C. Ajuste de los parámetros de medida de área y perímetro previo a la delimitación del Am de la imagen. D. Cálculo del Am y P desde la opción Analyze en ImageJ. E y F. Distribución de goteros Mariotte en campo.

tiempo. Estas variables se calculan con respecto a los datos colectados en los sitios de estudio y varían según las características físicas del suelo (Márquez-Romance y Guevara-Pérez, 2012).

La infiltración acumulada se obtiene al realizar la integración de la ecuación de la velocidad de infiltración:

$$I = \int i dt \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde I es la infiltración acumulada o lámina de agua acumulada (L) e i es la integral de la infiltración instantánea con respecto al tiempo.

Teniendo entonces que la infiltración acumulada será:

$$I = KT^m \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde K es la lámina de agua acumulada en el perfil del suelo cuando $T = 1$ minuto. Y m es la pendiente de la curva de infiltración acumulada versus el tiempo $I = f(T)$, $m = n - 1$ (Cerquera, López y Ramos, 2010).

Según lo anterior, para la obtención de la velocidad de infiltración instantánea acumulada (v_{ii}) se relacionó el caudal de los goteros q_g en un tiempo (t) y su respectiva área mojada (A_m), asociada a la intensidad de precipitación instantánea (I_p), como se expresa en la ecuación 4;

$$I_p = v_{ii} = \frac{q_g}{A_m} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde

v_{ii} : Velocidad de infiltración instantánea de un suelo en mm/hr.

Q_{gm} : Sumatoria del caudal de los goteros m^3/hr .

A_{m_n} : Sumatoria de áreas mojadas por gotero en m^2

Posteriormente, se realizó un promedio para cada una de las repeticiones hechas en campo; estos datos se plasmaron en un gráfico de dispersión y se les aplicó un ajuste potencial para hacerse con los parámetros K , n y R^2 (Delgadillo y Pérez, 2016).

Determinación de la velocidad de infiltración básica (V_{ib}). La velocidad de infiltración básica (V_{ib}) de cada uno de los suelos estudiados se determinó a partir del cálculo de la v_{ii} . Se calcularon promedios de las V_{ib} para los suelos analizados a partir de la utilización de los goteros tipo Mariotte y sus tres repeticiones, aplicando la ecuación 1 (Castellanos-Navarrete *et al.*, 2013).

Correlación de lámina de agua aplicada por goteros Mariotte. Con el propósito de verificar la absorción del flujo entregado por los goteros, se realizó una extracción de suelo a ± 20 cm de profundidad en la primera repetición de la aplicación de lámina de agua por medio de los goteros Mariotte sustrayendo el suelo contenido dentro del perímetro mojado de cada uno de ellos. Mediante la aplicación del Método de Humedad Volumétrico (MHV) se verificó el contenido de agua entregada por los goteros al área de suelo delimitada (Largaespada y Henríquez, 2015; Martín, 2017), asociando la siguiente expresión:

$$HV = \frac{Ph - Ps}{Ps} * 100 \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

HV: Humedad volumétrica en %

Ph: Peso húmedo de la muestra en kg

Ps: Peso seco de la muestra en kg

La humedad inicial se determinó utilizando el equipo TDR® (Time Domain Reflectometer), 6050X3K1B-MiniTrase Kit, Soilmoisture Equipment Corp, Santa Bárbara California) con varilla a 20 cm de profundidad, las muestras obtenidas se introdujeron al horno a 80°C por 24 horas en la zona de invernaderos de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira.

Resultados y discusión

Utilización de goteros Mariotte para determinación de áreas mojadas (Am). El área mojada (*Am*) se obtuvo de la toma de imágenes (Figura 2.A) con cámara fotográfica usando una distribución completamente al azar (Badii, Castillo, Rodríguez, Wong y Villalpando, 2007). De las tres repeticiones en cada zona de trabajo, se distribuyó la aplicación de la lámina de agua en diferentes sitios al interior de las parcelas de estudio, como se observa en la Figura 2.E.F.

Para cada gotero se realizaron intervalos de +/- 4 mediciones, analizando las imágenes resultantes en el software ImageJ (Figura. 2.A.) y estableciendo la escala (medida conocida) con una reglilla de 10 cm; estos valores y unidades fueron ingresados en la configuración de la escala (Figura 2.B). Se delimitó el *Am* con ayuda de un polígono libre en las opciones de dibujo, pasando al cálculo de las variables de interés *Am* y *P* para todas las repeticiones (Figura 2.C.D).

Los valores de *Am* que arrojó el análisis de imágenes se muestran en la Tabla 1, que dan como resultado un promedio de 0.16 m² para la finca San Marcos, 0.09 m² en la finca El Encanto y 0.08 m² para la finca Bellavista. Teniendo en cuenta que los orificios de salida de todos los goteros fueron diseñados con el mismo diámetro, se observa una diferencia de 0.08 m² para la finca San Marcos con respecto a la finca Bellavista; esta característica se pudo presentar debido a las propiedades asociadas a la textura del suelo del área de estudio, mientras que la variación entre las fincas El Encanto y Bellavista fue de 0.01 m².

Para la finca Bellavista se visualizó cómo el área de humedecimiento se empieza a estabilizar a partir de los 0.22 m² para La Carbonera, a 0.12 m² para Villa Hermosa y a 0.10 m² para La Tulia; de ello se obtuvo que el *Am* para las tres fincas tiende a volverse constante después de los 2.26 L de lámina aplicada por medio de los goteros (Tabla 1).

Una vez fue calculada la *vii*, a partir de los valores obtenidos en la Tabla 1., se usaron regresiones del tipo potencial para obtener los coeficientes *K* y *n* para la ecuación 1 como lo reportan Márquez-Romance y Guevara-Pérez (2012), Mujica *et al.*, (2012) y Rodríguez-Vásquez *et al.*, (2008), calculando bajo el modelo de Kostiakov la velocidad de infiltración básica (*Vib*), como se observa en la Tabla 2. Con respecto a los valores obtenidos de *R*² a partir de la regresión potencial, se percibió que fueron superiores a 0.98. Según Mujica *et al.* (2012); estos valores se encuentran dentro de lo esperado para este tipo de experimentaciones en las que se correlaciona el modelo de Kostiakov. Así mismo, estos datos son similares a los reportados por Béjar-Pulido *et al.* (2021) al utilizar el método de doble anillo para evaluar y predecir la infiltración en un suelo de tipo Andosol, pero menores al compararlo con otros métodos como el de pozo variable o Porchet y el permeámetro de Guelph, reportado por Alvarado-Batres y Barahona-Palomo (2016). Según Béjar-Pulido *et al.* (2021) el modelo de Kostiakov es el que presenta la mejor predicción con respecto a la variable de la infiltración en el suelo, puesto que los valores del *R*² podrían ser mayores a 0.94 en comparación con el modelo de Horton y Mezencev.

Las Figuras 3, 4 y 5 presentan un comportamiento potencial típico de la velocidad de infiltración acumulada como lo mencionan Alvarado-Batres y Barahona-Palomo (2017); Bedbabis, Rouina, Boukhris y Ferrara (2014); Dong, Huang y Gao (2017); y Qian, Cheng y Liu (2014) utilizando métodos de infiltración tradicional como el infiltrómetro de doble anillo o algunos simuladores de lluvias.

La *Vib* calculada para la finca San Marcos y El Encanto puede clasificarse como baja comparada con los valores reportados por Hernández-Florez *et al.* (2009) para parcelas con suelos en descanso y lotes con presencia de cultivos de papa; similar a la actividad agrícola a la que se dedican ambas fincas con presencia de mora (*Rubulus glaucus* var. Castilla) (San Marcos) y piña (*Ananas comosus* L. Merr). Hubo diferencia de la velocidad de infiltración básica en la finca Bellavista, donde se obtuvo un valor de 38.00 mm-hr⁻¹, que según Hernández-Florez sería rápida o super rápida en contraste con suelos con presencia de vegetación nativa y mínima alteración. Lo anterior ocurre como resultado de la buena agregación y estructura del suelo, junto con una alta presencia de materia orgánica dado por el manejo de la parcela al ser una finca que se dedica a la exportación del aguacate (*Persea americana* var Hass). De Almeida *et al.* (2018) muestran que la infiltración está sujeta al uso del suelo, por lo que las labores de labranza impactarán sobre sus valores, según sea el caso.

Cálculo de humedad volumétrica (HV). Para verificar el volumen de agua entregado por los goteros durante el proceso de aplicación y sus valores en el

Tabla 1. Comportamiento de la lámina de agua aplicada por medio de los goteros Mariotte a diferentes intervalos de tiempo y su relación con el área mojada (Am) por finca

Finca San Marcos					
	TI min	T _{acu} hr	Am m ²	V l	Lam _{acu} cm
Botella 2.0 l	0	0	0	0	0
	5	0.08	0.07	0.59	9.74
	10	0.25	0.13	1.18	19.47
	15	0.50	0.20	1.77	29.21
	18.67	0.81	0.20	2.00	33.00
Botella 3.0 l	0	0.00	0	0	0
	5	0.09	0.08	0.55	8.13
	10	0.25	0.13	1.11	16.26
	15	0.50	0.13	1.66	24.38
	20	0.84	0.17	2.22	32.51
	28.5	1.31	0.23	3.00	44.00
Botella 3.5 l	0	0.02	0	0	0
	5	0.10	0.13	0.55	8.64
	10	0.27	0.20	1.10	17.29
	15	0.52	0.22	1.65	25.93
	20	0.85	0.28	2.20	34.57
	33.25	1.40	0.36	3.52	55.37
Botella 4.0 l	0	0.02	0	0	0
	5	0.11	0.09	0.59	9.74
	10	0.27	0.13	1.18	19.47
	15	0.52	0.16	1.77	29.21
	20	0.86	0.21	2.36	38.94
	35.82	1.45	0.27	4.00	66.00
Finca El Encanto					
	TI min	T _{acu} hr	Am m ²	V l	Lam _{acu} cm
Botella 2.0 l	0	0.00	0	0	0
	5	0.08	0.05	0.59	9.74
	10	0.25	0.07	1.18	19.47
	14.72	0.50	0.07	1.92	31.74
	18	0.80	0.03	2.00	33.00
Botella 3.0 l	0	0.01	0	0	0
	5	0.09	0.07	0.55	8.13
	10	0.26	0.09	1.11	16.26
	15	0.51	0.12	1.66	24.38
	20	0.84	0.14	2.22	32.51
	25.86	1.27	0.14	3.00	44.00

proceso de infiltración, se extrajo la cantidad de suelo correspondiente al área mojada (Am) final en la primera repetición a profundidad variable según el bulbo húmedo resultante. Se obtuvo un total de 42.5 kg de la finca San Marcos, 47.1 kg del predio El Encanto y 44.1 kg de la finca Bellavista, en peso húmedo.

Botella 3.5 l	0	0.03	0	0	0
	5	0.11	0.09	0.55	8.64
	10	0.28	0.10	1.10	17.29
	15	0.53	0.11	1.65	25.93
	20	0.86	0.12	2.20	34.57
	26.35	1.30	0.12	3.50	55.00
Botella 4.0 l	0	0.03	0	0	0
	5.00	0.11	0.043	0.58	9.52
	10.00	0.28	0.061	1.15	19.03
	15.00	0.53	0.089	1.73	28.55
	20.00	0.86	0.102	2.31	38.06
	32.53	1.40	0.113	3.77	62.15
	45.07	2.11	0.135	4.00	66.00

Finca Bellavista					
	TI min	T _{acu} hr	Am m ²	V l	Lam _{acu} cm
Botella 2.0 l	0	0.00	0	0	0
	5	0.08	0.07	0.59	9.74
	10	0.25	0.08	1.18	19.47
	15	0.50	0.09	1.77	29.21
	16.6	0.78	0.11	2.00	33.00
Botella 3.0 l	0	0.01	0	0	0
	5	0.09	0.06	0.55	8.13
	10	0.26	0.07	1.11	16.26
	15	0.51	0.08	1.66	24.38
	20	0.84	0.09	2.22	32.51
	25.86	1.27	0.09	3.00	44.00
Botella 3.5 l	0	0.02	0	0	0
	5	0.10	0.08	0.55	8.64
	10	0.27	0.10	1.10	17.29
	15	0.52	0.11	1.65	25.93
	20	0.85	0.12	2.20	34.57
	26.5	1.29	0.13	3.50	55.00
Botella 4.0 l	0	0.03	0	0	0
	5	0.11	0.06	0.59	9.74
	10	0.28	0.06	1.18	19.47
	15	0.53	0.07	1.77	29.21
	20	0.86	0.08	2.36	38.94
	30	1.37	0.08	3.69	60.94
	33.89	1.94	0.08	4.00	66.00

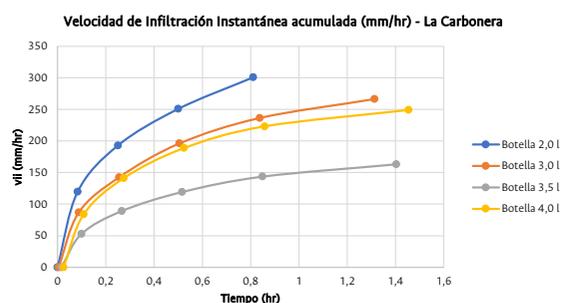
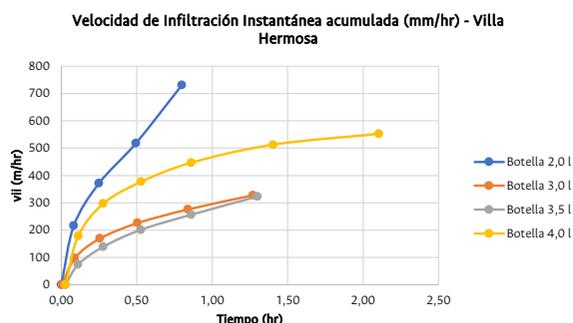
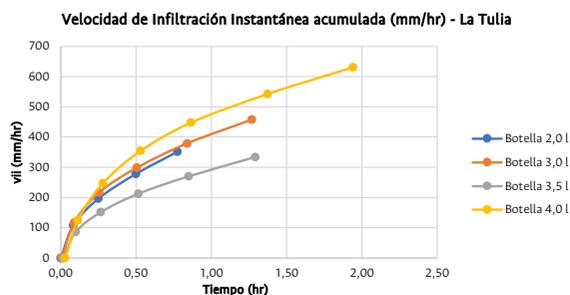
TI: Intervalo de tiempo definido (minutos). T_{acu}: Intervalos de tiempo acumulado (horas). Am: Área mojada para cada intervalo de tiempo establecido (metros cuadrados). V: Volumen de descarga para cada gotero en el intervalo de tiempo (litros). Lam_{acu}: Lámina de agua acumulada para cada intervalo de tiempo (centímetros). Velocidad de infiltración instantánea acumulada (**v_{ia}**) vs. velocidad de infiltración básica (**v_b**).

La humedad previa al inicio del ensayo se midió con un Reflectómetro TDR®, lo cual arrojó valores de 0 % para la finca San Marcos y El Encanto, mientras que para Bellavista el equipo reportó 32 % de humedad. Este valor fue restado en el peso total de humedad volumétrica (W) como se observa en

Tabla 2. Coeficientes correspondientes asociados al modelo empírico de Kostiakov y el valor de la velocidad de infiltración básica en las fincas

	Coeficientes para ecuación de Kostiakov				
	Vib mm hr ⁻¹	K	m	R ²	Textura
Suelo San Marcos	1.29	1.78	-0.32	0.995725	Arcillo-Limosa
Suelo El Encanto	1.40	1.88	-0.35	0.987525	Arcilloso
Suelo Bellavista	38.00	1.91	-0.36	0.993075	Franco-Limosa tendiente a arenosa

Vib: Velocidad de infiltración básica del suelo (milímetros hora). K es la constante, representa la velocidad de infiltración para T=1 min. m es la pendiente de la regresión potencial de la velocidad de infiltración acumulada. R²: Porcentaje de variación de la variable de respuesta para cada suelo.

**Figura 3.** Comportamiento de la v_{ii} (mm/hr) para los goteros en La Carbonera, Pradera.**Figura 4.** Comportamiento de la v_{ii} (mm/hr) para los goteros en Villa Hermosa, Dagua.**Figura 4.** Comportamiento de la v_{ii} (mm/hr) para los goteros en Villa Hermosa, Dagua.

la Tabla 3, según lo propuesto por Largaespada y Henríquez (2015). El fenómeno anterior se dio como resultado del proceso de manejo de la hojarasca y la cobertura verde que se mantienen en el predio para disminuir el uso de riego durante todo el año a diferencia de los otros dos predios, en los que la mayoría del año se deja sin cobertura, principalmente por las labores de cultivo.

En la Tabla 3 se ve cómo el peso total W corresponde aproximadamente al volumen de trabajo de los goteros o botellas, confirmando la lámina de agua entregada durante la experimentación, a pesar de que fuera en zonas de ladera. Rosales *et al.* (2020) destacan la importancia de la humedad a la hora de planificar el uso del suelo, ya que este puede afectar el valor de la resistencia a la penetración para suelos agrícolas, haciendo más difícil la labranza en suelos con mayor plasticidad.

Mediante el Modelo de Humedad Volumétrica (MHV) (Ecuación 5), se calculó el porcentaje del volumen de trabajo de los goteros en las zonas de estudio; sin embargo, considerando la humedad inicial del predio Bellavista su %HV tuvo un valor de 76.57 mucho más alto, a diferencia de los predios San Marcos y El Encanto, donde la humedad fue de 30.14 % y 39.36 % respectivamente. Según Martín (2017), la humedad ideal de un suelo debe mantenerse a capacidad de campo (CC); esta medida de humedad se encuentra aproximadamente a 0.3 bar de presión o al 33 % del contenido total de humedad volumétrica. Dados los resultados obtenidos por medio de los goteros Mariotte utilizados para este trabajo, donde la %HV se mantiene arriba de 30 %, esta ayudaría en el mantenimiento de la humedad a CC en zonas con uso de suelo agrícola en ladera.

Conclusiones

La Vib calculada a partir de la utilización de goteros Mariotte de bajo volumen de trabajo arrojaron valores entre los rangos citados por la literatura con respecto a la textura del suelo, dados los valores de 1.29 mm.hr⁻¹ para un suelo arcillo-limoso, 1.40 mm.hr⁻¹ para un suelo arcilloso y de 38.00 mm.hr⁻¹ para un suelo franco-limoso con tendencia a arenoso. Se espera que para suelos con altos contenidos de arcillas el proceso de infiltración se presente de manera más lenta por el tamaño de los poros y por la tendencia a la compactación y erosión, mientras que para suelos con mayores contenidos de arenas la infiltración será mucho más rápida. Esta estimación permite establecer una medida de referencia para las zonas de ladera aledañas a los sitios de muestreo para la formulación de estrategias de manejo de coberturas y riego que pueda mantener mejor la estructura, la agregación y la humedad del suelo, evitando su degradación.

Tabla 3. Cálculo de humedad volumétrica para cada suelo evaluado. Peso húmedo con impurezas del suelo (kg). Peso seco de las muestras de suelo sin impurezas (kg). Peso impurezas de las muestras (kg).

Contenido de Humedad Volumétrica (MTH%) Peso de muestras de suelo - San Marcos					
	Botella 2.0	Botella 3.0	Botella 3.5	Botella 4.0	Total
Peso húmedo (kg)	15.774	11.112	13.454	18.688	59.028
Peso seco (kg)	12.669	7.028	9.274	13.571	42.542
Peso impurezas (kg)	0.956	0.992	0.724	0.993	3.665
Peso total W (Kg)	2.149	3.092	3.456	4.124	12.821
% HV	16.96	44.00	37.27	30.39	30.14
Peso de muestras de suelo - El Encanto					
Peso húmedo (kg)	8.314	11.474	13.238	14.120	47.146
Peso seco (kg)	5.515	8.075	9.655	9.38	32.625
Peso impurezas (kg)	0.658	0.406	0.068	0.549	1.681
Peso total W (kg)	2.141	2.993	3.515	4.191	12.840
%HV	38.82	37.07	36.41	44.68	39.36
Peso de muestras de suelo - Bellavista					
Humedad Inicial del suelo (kg)	3.6	2.52928	2.69184	5.2832	14.10432
Peso húmedo (kg)	11.250	7.904	8.412	16.51	44.076
Peso seco (kg)	5.454	2.248	2.150	7.122	16.975
Peso impurezas (kg)	0	0	0	0	0
Peso total W (kg)	2.196	3.12672	3.570	4.105	12.997
%HV	40.264	39.559	42.438	57.630	76.568

Peso total W: Peso total de la humedad de las muestras sin impurezas (kilogramos). %HV: Porcentaje de humedad volumétrica con respecto al peso húmedo, seco e impurezas de las muestras.

El área mojada (A_m) es un parámetro fundamental para el cálculo de la velocidad de infiltración instantánea (v_{ii}) y acumulada (v_{ia}) en el suelo, por lo que su correcta estimación en campo a partir del análisis de imágenes y el uso de goteros tipo Mariotte de bajo volumen podría ser una herramienta útil dentro de los sistemas de riego de alta frecuencia para zonas de ladera, que aporte información para la gestión adecuada del recurso hídrico en el Valle del Cauca.

Agradecimientos

Agradecimientos al Sistema General de Regalías-SGR por otorgar recursos para el desarrollo de la experimentación del Proyecto BPIN 2014000100010. También a los agricultores Harold Mesa (ASOVILLAHERMOSA), Oswaldo Gutiérrez (FUNDECAR), Carlos Vallejo y Ramiro Millán (ASOAGUACATULIA).

Referencias

Aday-Díaz, O. de la C.; González-Hernández, R.; Díaz-Mujica, F. R.; Reyes- Esquirol, C.; Gil-Cruz, Y.; Reyes-Pérez, S. y Barroso-Melillo, J. (2017). Aplicación del software ImageJ® 1.43u en la caracterización de los síntomas de

la mancha anular de la caña de azúcar. *Centro Agrícola*. 44(2), 83-88. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-57852017000200011

Ali, M. H. (2010). *Fundamentals of irrigation and on-farm water management* (Vol. 1). New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6335-2>

Alvarado Batres, C. y Barahona-Palomo, M. (2017). Comparación de tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la Cuenca del río Suquiapa, El Salvador. *Cuadernos de Investigación UNED*, 9(1), 23-33. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S1659-42662017000100023&script=sci_abstract&tlng=es

Ávila-Dávila, L.; Soler-Méndez, M.; Madrona-Sánchez, P.; Ruiz-Canales, A.; Bautista-Capetillo, C.F.; González-Trinidad, J. y Molina-Martínez, J. M. (2019). Análisis de la velocidad de infiltración del agua en el suelo saturados mediante lisímetros de pesada. En *X Congreso Ibérico de Agroingeniería*, (pp. 642-648). DOI: [10.26754/c_agroing.2019.com.3370](https://doi.org/10.26754/c_agroing.2019.com.3370)

Badii, M. H.; Castillo, J.; Rodríguez, M.; Wong, A. y Villalpando, P. (2007). Diseños experimentales e investigación científica. *Revista Innovaciones de Negocios*, 4(2), 283-330. <https://doi.org/10.29105/rinn4.8-5>

Béjar-Pulido, S. J.; Cantú-Silva, I.; Yáñez-Díaz, M. I. y Luna-Robles, E. O. (2021). Evaluation and prediction of infiltration in an Andosol under different land uses. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(7), 1171-1183. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i7.2327>

- Bedbabis, S.; Ben Rouina, B.; Boukhris, M. y Ferrara, G. (2014). Effect of irrigation with treated wastewater on soil chemical properties and infiltration rate. *Journal of Environmental Management*, 133, 45–50. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.007>
- Beléndez, A.; Francés, J.; Ortuño, M.; Gallego, S.; Márquez, A.; Beléndez, T. y Arribas Garde, E. (2013). El frasco de Mariotte: vaciado de un depósito a velocidad constante. Em E. Arribas y A. Nájera (Eds.), *Experiencias de innovación docente en la enseñanza de la física universitaria 3.0* (pp. 99-111). Albacete. <http://hdl.handle.net/10045/30418>
- Castellanos-Navarrete, A.; Chocobar, A.; Cox, R. A.; Fonteyne, S.; Govaerts, B.; Jespers, N.; Kienle, F.; Sayre, K.D. y Verhulst, N. (2013). Infiltración: Guía útil para comparar las prácticas de manejo de cultivo. <https://docplayer.es/19375005-Infiltracion-guia-util-para-comparar-las-practic-as-de-manejo-de-cultivo.html>
- Cerquera, Y. A.; López, G. A. y Ramos, L. J. (2010). Diseño de un sistema electrónico digital para automatizar la prueba de capacidad de infiltración del suelo en campo. *Revista Ingeniería y Región*, 7, 45–56. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5432297>
- Cepeda-Rendón, J. M. (2008). Modelo de Bresler y Dasberg para la infiltración de goteo. *Revista de Topografía Azimut*, 2, 91–102. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/azimut/article/view/4051>
- Chicas-Soto, R. A.; Vanegas Chacón, E. A. y García Álvarez, N. (2014). Determinación indirecta de la capacidad de retención de humedad en suelos de la subcuenca del río Torjá, Chiquimula, Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(1), 41–46. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93231102008>
- Delgadillo, O. y Pérez, L. (2016). *Medición de infiltración del agua en el suelo: Método de doble anilla*. Cochabamba, Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA). http://www.centro-agua.umss.edu.bo/wp-content/uploads/2022/04/S_T_12016_Medicion_infiltracion_doble_anilla.pdf
- De Almeida, W. S.; Panachuki, E.; De Oliveira, P. T. S.; Da Silva-Menezes, R.; Alves-Sobrinho, T. y Fonseca-De Carvalho, D. (2018). Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. *Soil and Tillage Research*, 175, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.009>
- Dong, H.; Huang, R. y Gao, Q. F. (2017). Rainfall infiltration performance and its relation to mesoscopic structural properties of a gravelly soil slope. *Engineering Geology*, 230, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.09.005>
- Flammini, A.; Morbidelli, R.; Saltalippi, C.; Picciafuoco, T.; Corradini, C. y Govindaraju, R. S. (2018). Reassessment of a semi-analytical field-scale infiltration model through experiments under natural rainfall events. *Journal of Hydrology*, 565, 835–845. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.073>
- Hernández Flórez, F.; Alba Triana, F. y Daza Tórrez, M. C. (2009). Efecto de actividades agropecuarias en la capacidad de infiltración de los suelos del Páramo del Sumapaz. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 8(8), 29–38. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=231116390004>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas. (1997). Norma para la gestión ambiental. Calidad del suelo. Muestreo. Guía sobre técnicas de muestreo. N.º NTC4113-2:1997. ICONTEC. Bogotá D. C. <https://tienda.icontec.org/macrosectores.html>
- Igboekwe, M. U. y Adindu, R. U. (2014). Use of Kostiakov's infiltration model on Michael Okpara University of Agriculture, Umudike Soils, Southeastern, Nigeria. *Journal of Water Resource and Protection*, 6(10), 888–894. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2014.610083>
- Largaespada, K. y Henríquez, C. (2015). Distribución espacial de la humedad y su relación con la textura en un suelo. *Agronomía Costarricense*, 39(1), 137–147. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242015000300137&lng=en&tlng=es
- Liu, Z.; Ma, D.; Hu, W. y Li, X. (2018). Land use dependent variation of soil water infiltration characteristics and their scale-specific controls. *Soil and Tillage Research*, 178, 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.01.001>
- Marinho, F. A. M. y Olivera, O. M. (2006). The filter paper method revisited. *Goetechnical Testing Journal*, 29(3), 1–9. <https://pdfcoffee.com/the-filter-paper-method-revisited-pdf-free.html>
- Márquez-Romance, A. y Guevara-Pérez, E. (2012). Modelación de la infiltración en un campo agrícola de la cuenca del río Chirgua, estado de Carabobo, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola*, 12(2), 365–388. <http://www.bioline.org.br/pdf?cg12043>
- Martin, E. C. (2017). Métodos para medir la humedad del suelo para la programación del riego ¿Cuándo? . E. Martin y C. Munoz, College of Agriculture and Life Sciences. Arizona: University of Arizona. <http://hdl.handle.net/10150/625275>
- Morbidelli, R.; Saltalippi, C.; Flammini, A.; Cifrodelli, M.; Picciafuoco, T.; Corradini, C. y Govindaraju, R. S. (2016). Laboratory investigation on the role of slope on infiltration over grassy solis. *Journal of Hydrology*, 543, 542–547. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.10.024>
- Morbidelli, R.; Saltalippi, C.; Flammini, A.; Cifrodelli, M.; Picciafuoco, T.; Corradini, C. y Govindaraju, R. S. (2017). In situ measurements of soil saturated hydraulic conductivity: Assessment of reliability through rainfall-runoff experiments. *Hydrological Processes*, 31(17), 1–39. <https://doi.org/10.1002/hyp.11247>
- Mujica, A.; Carmenates, D. y Paneque, P. (2012). Determinación de la forma y dimensiones del bulbo húmedo en el riego subsuperficial para el cultivo de la caña de azúcar. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21, 59–62. <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v21s1/rcta13esp12.pdf>
- Qian, F.; Cheng, D. y Liu, J. (2014). Analysis of the water and soil erosion and infiltration characteristic in Ziquejie Terrace. *IERI Procedia*, 9, 13–19. <https://doi.org/10.1016/j.ieri.2014.09.034>
- Qian, F.; Cheng, D.; Liu, J.; Hayek, M.; Carmi, G.; Abudi, I. y Kayhanian, M. (2018). Approximate solution of a one-dimensional soil water infiltration equation based on the Brooks-Corey model. *Journal of Hydrology*, 129, 1120–1132. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.01.001>
- Rodríguez-Vásquez, A. F.; Aristizábal-Castillo, A. M. y Camacho-Tamayo, J. H. (2008). Variabilidad espacial de los modelos de infiltración de Philip y Kostiakov en un suelo Ándico. *Engharia Agrícola*, 28(1), 64–75. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162008000100007>
- Rosales-Naranjo, L.; Pérez-Rodríguez, M.; Herrera-Puebla, J.; González-Rodríguez, J. A. y Cid-Lazo, G. (2020). Efecto del manejo del suelo sobre la infiltración en un suelo Ferralítico Rojo compactado. *Revista Ingeniería Agrícola*, 10(4), 20–30. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=586264983003>
- Valenciano, D. S. (2014). *Análisis del software ImageJ para el análisis científico de imágenes* [Tesis de pregrado, Departamento de Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones. Universidad Politécnica de Madrid]. <https://oa.upm.es/33069/>