



Humedad del suelo y su relación con la cantidad de lluvia en la zona cafetera central de Colombia

Soil Moisture and its Ratio to Rainfall in the Central Coffee-Growing Area of Colombia

Umidade do solo e sua relação com a quantidade de chuva na região cafeeira central da Colômbia

Luz Adriana Lince Salazar¹  

Ninibeth G. Sarmiento H.²  

Recibido: 27 de marzo de 2025

Aceptado: 10 de diciembre de 2025

Para citar este artículo: Lince, L. A. y Sarmiento, N. (2025). Humedad del suelo y su relación con la cantidad de lluvia en la zona cafetera central de Colombia. *Revista Científica*, 52(2), 58-75. <https://doi.org/10.14483/23448350.23463>

Resumen

Los cultivos de café en Colombia suplen sus requerimientos hídricos con el agua almacenada en el suelo producto de las lluvias. Dada la importancia de la relación entre la lluvia y humedad del suelo, se realizó una investigación entre 2018 y 2021 en un cultivo de *Coffea arabica* L. en etapa de producción, plantado en un suelo *typic melanudands* de la zona central de Colombia. Se registró la lluvia diaria y la humedad del suelo, expresada como tensión hídrica de 25 a 60 cm de profundidad del perfil, y se analizaron las series desde la escala diaria a anual. Con respecto a la normal climatológica de 1991-2020, la lluvia acumulada en 2018 fue superior, e inferior en 2019 y 2021. En 2020, estuvo dentro del rango histórico, con un predominio de décadas con lluvia >80 mm. La tensión hídrica del suelo en un 80 % estuvo entre 0 y -33 kPa, y fue diferente entre profundidades: a 25 cm reportó más días con el suelo cercano al grado de saturación, mientras que las otras profundidades estuvieron una cantidad de días similar con tensión hídrica menor a -50 kPa. En decádica, la primera década de agosto tuvo el suelo seco en los tres años, y 2019 el año con más eventos de suelo seco, concentrados entre enero-febrero y julio-agosto. El suelo presentó menor humedad en los eventos precedidos por décadas de lluvia <10 mm. Además, el suelo con tensiones hídricas menores a -50 kPa requirió una lluvia decádica >80 mm para alcanzar la capacidad de campo.

Palabras clave: café, capacidad de campo, estrés hídrico, lluvia acumulada, profundidad del suelo, sequía, tensiómetro, tensión hídrica

1. Cenicafé, Investigadora Científica (hasta marzo de 2025), adrilince@gmail.com
2. Cenicafé, Investigadora Científica, ninibeth.sarmiento@cafedecolombia.com

Abstract

Coffee crops in Colombia meet their water requirements with water stored in the soil as a result of rainfall. Given the importance of the relationship between rainfall and soil moisture, a study was conducted between 2018 and 2021 in a productive *Coffea arabica* L. plantation established on a typic melanudands soil in the central region of Colombia. Daily rainfall and soil moisture, expressed as soil water tension from 25 to 60 cm depth in the profile, were recorded, and the series were analyzed from daily to annual scales. Relative to the 1991–2020 climatological normal, annual rainfall in 2018 was superior and inferior in 2019 and 2021. In 2020, it remained within the historical range, with a predominance of dekads with rainfall >80 mm. Soil water tension values were between 0 and -33 kPa for 80% of the time, and differed with depth: at 25 cm, there were more days with soil conditions close to saturation, whereas the other depths showed a similar number of days with water tension below -50 kPa. At the dekadal scale, the first dekad of August corresponded to dry-soil conditions over the three years, and 2019 was the year with the highest number of dry-soil events, concentrated between January-February and July-August. Soil water content was lower in events preceded by dekads with rainfall <10 mm. In addition, when soil water tension dropped below -50 kPa, a dekadal rainfall total >80 mm was required for the soil to reach field capacity.

Keywords: coffee, field capacity, water stress, accumulated rain, soil depth, drought, tensiometer, water pressure

Resumo

As lavouras de café na Colômbia suprem suas exigências hídricas com a água armazenada no solo proveniente das chuvas. Dada a importância da relação entre precipitação e umidade do solo, foi conduzido um estudo entre 2018 e 2021 em uma lavoura de *Coffea arabica* L. em fase de produção, estabelecida em um Typic Melanudands na região central da Colômbia. A precipitação diária e a umidade do solo, expressa como tensão da água no solo entre 25 e 60 cm de profundidade do perfil, foram registradas e as séries foram analisadas nas escalas diária até anual. Em relação à normal climatológica de 1991–2020, a precipitação anual acumulada em 2018 foi superior, enquanto em 2019 e 2021 foi inferior à média histórica. Em 2020, manteve-se dentro da faixa histórica, com predominância de decêndios (períodos de 10 dias) com chuva >80 mm. Em 80 % do período, a tensão da água no solo esteve entre 0 e -33 kPa, com diferenças entre profundidades: a 25 cm registrou-se maior número de dias com o solo próximo à saturação, enquanto as demais profundidades apresentaram número semelhante de dias com tensão da água no solo inferior a -50 kPa. Em escala decádica, o primeiro decêndio de agosto apresentou solo seco nos três anos, e 2019 foi o ano com maior número de eventos de solo seco, concentrados entre janeiro–fevereiro e julho–agosto. O solo apresentou menor umidade em eventos precedidos por decêndios com chuva <10 mm. Além disso, quando a tensão da água no solo foi inferior a -50 kPa, foi necessária uma chuva decádica >80 mm para que o solo atingisse a capacidade de campo.

Palavras-chaves: café, capacidade de campo, estresse hídrico, chuva acumulada, profundidade do solo, seca, tensiômetro, tensão da água

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua es un factor limitante para la producción agrícola. En la zona central de Colombia, los cultivos de café suplen este requerimiento con el agua que queda almacenada en el suelo tras las lluvias ([Jaramillo et al., 1999](#)). La disponibilidad hídrica, marcada por la estacionalidad de la lluvia, determina la planificación de prácticas agronómicas como la selección de épocas de siembra, la fertilización y el manejo de plagas y enfermedades, entre otros.

La zona cafetera central de Colombia, ubicada entre los 3 y los 7° de latitud norte, presenta, en su mayoría, un régimen bimodal producto del movimiento latitudinal de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) ([Jaramillo et al., 2011](#)), con dos períodos de mayores precipitaciones entre marzo y junio y entre septiembre y diciembre, y dos períodos de menores lluvias entre enero y febrero y entre julio y agosto.

Adicional a la ZCIT, otros factores influyen en los patrones de precipitación de la región cafetera colombiana, los cuales pueden influir en las cantidades de lluvia y la duración de los periodos secos y húmedos. Entre ellos están el Chorro del Chocó ([Poveda et al., 1999](#)), la interacción entre valles y montañas, los ríos atmosféricos y, en la escala interanual, principalmente el fenómeno El Niño Oscilación Sur (ENOS) ([Poveda et al., 2006, 2001](#)).

Durante la fase fría del ENOS, *i.e.*, La Niña, los períodos húmedos son más intensos y de mayor duración. Asimismo, los períodos de menos lluvias pueden ser más cortos. En contraste, durante la fase El Niño, los períodos de menos lluvia se extienden, y, en los períodos húmedos, los volúmenes de precipitación se reducen significativamente respecto a las condiciones históricas ([Urrea et al., 2019](#)).

El agua que queda almacenada en el suelo tras las lluvias es variable tanto en el espacio como en el tiempo ([Huisman et al., 2001](#)) y se atribuye a factores como la topografía; las prácticas de manejo; la precipitación; la evaporación ([Huisman et al., 2001](#); [Teuling & Troch, 2005](#)); la capacidad de retención de agua del suelo, que a su vez depende de la textura y el contenido de materia orgánica ([Lince Salazar & Sadeghian-Khalajabadi, 2023](#)); el contenido de fragmentos gruesos y la estructura ([Hlaváčiková et al., 2018](#)); la cobertura ([Crichlow et al., 2024](#)); y los diferentes sistemas agroforestales ([Kokila, et al., 2024](#)).

Las variaciones en el espacio, específicamente en la vertical, han sido relacionadas con la intensidad de la lluvia ([Liang et al., 2024](#); [Ran et al., 2025](#)), las humedades edáficas precedentes ([Han et al., 2024](#); [da Silva-Dias et al., 2024](#)) y la evapotranspiración ([Parkin, 2008](#); [Crichlow et al., 2024](#)). La relación entre la humedad del suelo y la lluvia ha permitido que la primera sea utilizada como un pluviómetro natural. Esto, en los sitios donde es posible determinar la humedad del suelo con satélites pero no es posible cuantificar la cantidad de lluvia ([Brocca et al., 2014](#)).

En el cultivo de café, el agua en el suelo cumple funciones determinantes en la nutrición ([Sadeghian, 2013](#)), los ciclos de crecimiento, la floración y la cosecha ([Florez et al., 2013](#)). La demanda hídrica puede variar entre 62 y 125 mm.mes⁻¹, dependiendo de la edad del cultivo, la densidad de la siembra y el tipo de sistema de producción ([Ramírez et al., 2013](#)). En la mayor parte de la caficultura colombiana, esta demanda es suplida por el aporte de las lluvias; en cafetales a libre exposición solar y bajo diferentes tipos de sombrero, la lluvia es interceptada hasta en un 62 %, y solo el 38 % se infiltra en el perfil del suelo ([Jaramillo, 1999](#)).

Dada la importancia de la humedad del suelo y su estrecha relación con la lluvia, se realizó una investigación en una plantación en la zona cafetera central de Colombia, evaluando dicha relación en el tiempo y en la profundidad del perfil.

METODOLOGÍA

Ubicación

Esta investigación se realizó entre junio de 2018 y diciembre de 2021 en la Estación Experimental Paraguaicito, ubicada en la región central de Colombia, en el municipio de Buenavista, departamento del Quindío. Esta estación está a 4.4° de latitud y -75.733° de longitud, a una altura de 1203 msnm. El suelo corresponde a un *typic melanudands* denominado *Unidad Quindío* (FNC, 1986). Las condiciones climáticas del sitio reflejan una distribución bimodal, con un aumento en las precipitaciones durante los periodos marzo-abril y octubre-noviembre (Figura 1), acompañado de disminuciones en la temperatura y el brillo solar. Según la normal climatológica 1991-2020, el promedio histórico de la precipitación acumulada anual es de 2199 mm, la temperatura media de 22.22 °C, el brillo solar de 1741 h y la humedad relativa de 78.27 %.

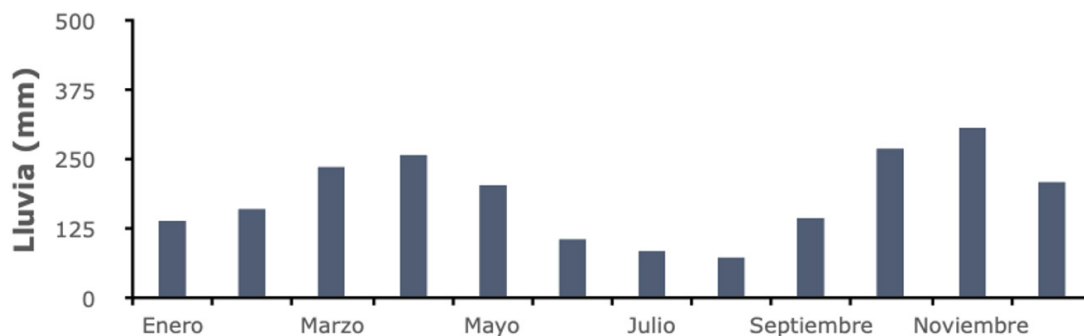


Figura 1. Distribución promedio mensual de la lluvia en la Estación Experimental Paraguaicito. Normal climatológica 1991-2020. Datos proporcionados por la Plataforma Agroclimática Cafetera.

Materiales e instalación

Se empleó un lote de 0.2 ha de topografía plana (0°), plantado con café variedad Castillo® Paraguaicito a una distancia de siembra de 1.0 x 1.4 m. Al inicio de la investigación, las plantas tenían 28 meses de edad. El lote se dividió en nueve parcelas de 168 m², para las cuales se realizaron análisis químicos y físicos del suelo en el laboratorio de Cenicafé (Tabla 1). Para monitorear el potencial mátrico del suelo, en cada una de las parcelas se instalaron tres tensiómetros manuales Irrrometer, ubicados a 25, 40 y 60 cm de profundidad del perfil. Como característica general, los tensiómetros miden la tensión real del agua en el suelo. Esto corresponde al esfuerzo requerido por las raíces para extraer el agua del suelo. Los tensiómetros no requieren calibración y no son afectados por la salinidad del suelo.

Medición de variables

La lectura de los tensiómetros se realizó de manera análoga, de lunes a viernes a las 6:15 am. Los valores de lluvia diaria fueron registrados por la estación agrometeorológica Paraguaicito, perteneciente a la Red de Estaciones Meteorológicas de Cenicafé. La evaporación superficial no fue evaluada; como no

representaba una fuente de variación en la investigación, se asumió como insignificante, tal como lo indican [Wang et al. \(2011\)](#). Esto se debió a que la superficie del suelo estuvo cubierta por vegetación todo el tiempo, con plantas de características agronómicas idénticas e igual manejo cultural de las parcelas.

Tabla 1. Valores promedio y error estándar de las propiedades químicas y físicas del suelo

Propiedad	Numero de datos	Promedio \pm Error estándar
pH	9	4.54 \pm 0.04
Materia orgánica, %	9	7.69 \pm 0.21
Potasio, cmol ⁺ .kg ⁻¹	9	0.20 \pm 0.01
Calcio, cmol ⁺ .kg ⁻¹	9	1.63 \pm 0.15
Magnesio, cmol ⁺ .kg ⁻¹	9	0.28 \pm 0.03
Aluminio, cmol ⁺ .kg ⁻¹	9	1.51 \pm 0.10
Fósforo, mg.kg ⁻¹	9	119.56 \pm 5.26
Hierro, mg.kg ⁻¹	9	210.00 \pm 11.03
Manganeso, mg.kg ⁻¹	9	16.11 \pm 0.79
Zinc, mg.kg ⁻¹	9	8.07 \pm 0.32
Capacidad de intercambio catiónico, cmol ⁺ .kg ⁻¹	9	19.89 \pm 0.72
Arena, %	9	70.39 \pm 0.57
Limo, %	9	11.64 \pm 0.79
Arcilla, %	9	17.98 \pm 0.54
Clase textural	9	Franco-arenosa
Densidad aparente, g.cm ⁻³	9	0.98 \pm 0.02
Densidad real, g.cm ⁻³	9	2.29 \pm 0.10
Conductividad hidráulica saturada, cm.h ⁻¹	8	6.54 \pm 0.57
Porosidad total, %	9	56.58 \pm 6.65
Retención de humedad a 0 kPa, % volumétrico	21	50.12 \pm 0.61
Retención de humedad a -20 kPa, % volumétrico	12	32.26 \pm 0.44
Retención de humedad a -33 kPa, % volumétrico	12	31.50 \pm 0.46
Retención de humedad a -50 kPa, % volumétrico	12	29.81 \pm 0.44
Retención de humedad a -100 kPa, % volumétrico	12	27.89 \pm 0.42
Retención de humedad a -1500 kPa, % volumétrico	12	23.48 \pm 0.49

Método de análisis de datos

Lluvia

La lluvia acumulada mensual y anual se comparó con la normal climatológica 1991-2020. Los registros diarios de precipitación fueron acumulados en períodos de diez días, denominados *décadas*, y se clasificaron en cuatro clases con base en rangos establecidos de acuerdo con la capacidad de almacenamiento de agua del suelo del lote experimental. Dicha capacidad responde al modelo $y = 37.58 - 1.93 \ln(x)$, donde y es el volumen de agua retenido y x la tensión hídrica. La clase muy baja (MB) corresponde a valores de lluvia acumulada ≤ 10 mm, lo que equivale aproximadamente a la mitad del volumen de agua que el suelo puede almacenar entre la capacidad de campo (-33 kPa) y el punto de marchitez permanente (-1500 kPa) a una profundidad de 25 cm (9.3 L.m⁻²). La clase baja (B) incluye valores de lluvia acumulada entre 10 mm (10 L.m⁻²) y ≤ 40 mm. El límite superior de este rango es cercano al doble del volumen de agua que el suelo puede almacenar entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (37.5 L.m⁻²), y representa, además, la cantidad mínima de agua (4 L/día) necesaria para que la planta de café en etapa de producción mantenga un adecuado desarrollo (Ramírez *et al.*, 2013). La clase media (M) se asignó a la lluvia acumulada mayor que 40 mm y menor o igual que 80 mm, un valor cercano a la capacidad de almacenamiento de agua a capacidad de campo (77.5 L.m⁻²). Por último, la clase alta (A) se asignó a la lluvia acumulada > 80 mm, lo que corresponde al volumen de agua que el suelo puede almacenar a una tensión de -15 kPa, superior a la capacidad de campo (-33 kPa).

Tensión hídrica – humedad del suelo

Para garantizar un análisis balanceado, se depuraron los datos, extrayendo 258 días de los 725 en el periodo estudiado. Los datos extraídos correspondían mayoritariamente a los días afectados por la aplicación de fertirriego y, en menor proporción, a aquellos en los cuales se secaron los tensiómetros y no se reportaron datos para algunas de las profundidades. Para cada día, se promediaron los datos de los nueve tensiómetros por profundidad (un tensiómetro por profundidad por parcela) y se tomó el promedio como valor diario de dicha profundidad. Se realizó un análisis estadístico descriptivo para las tres profundidades evaluadas (25, 40 y 60 cm) y se aplicó la prueba de normalidad de Kolmogorov Smirnov para los 467 datos de cada una de las profundidades.

Para la totalidad de los datos, la comparación de la humedad del suelo entre profundidades se realizó mediante una prueba de Kruskal y Wallis (KW), pues los datos no representaban una distribución normal. Cuando se observaron diferencias estadísticas (KW: $p < 0.05$), se repitió la prueba entre pares de grupos, a fin de identificar el grupo diferente. Esto, debido a que se trataba de un análisis de tres grupos (profundidades de 25, 40 y 60 cm).

Finalmente se definieron tres rangos de humedad del suelo: tensión hídrica < -40 kPa, considerado como *suelo seco*—por debajo de esta tensión, al tratarse de un suelo de textura franco-arenosa y conductividad hidráulica de 6.54 ± 0.57 cm h⁻¹, el suelo pierde humedad rápidamente; tensión hídrica ≥ -33 kPa y < -15 kPa, considerado como suelo con humedad adecuada para los cultivos; y humedad > -15 kPa, considerado suelo como muy húmedo.

Relación entre la humedad del suelo y la lluvia

Se tomaron las clases decádicas de condición de lluvia (MB, B, M y A) y se separaron por grupos según la clase de lluvia que la precedía. Así, se generaron 16 grupos: MB precedida MB, B precedida de MB, M precedida de MB, A precedida de MB, MB precedida de B, B precedida de B, M precedida de B, A

precedida de B, MB precedida de M, B precedida de M, M precedida de M, A precedida de M, MB precedida de A, B precedida de A, M precedida de A y A precedida de A.

Mediante estadística descriptiva y gráficos de cajas y bigotes, se analizó la distribución de los grupos por clases de eventos y la relación entre la tensión hídrica del suelo y la lluvia acumulada de las décadas que los precedían. La diferencia entre grupos se estableció con base en el traslape de la muesca en los gráficos. Posteriormente, se generaron grupos entre las clases de lluvia acumulada con la lluvia precedente y los rangos de humedad. Los datos se analizaron con los *softwares* Statgraphics (V. 5.2), SigmaPlot (V. 10.0) y Excel.

RESULTADOS

Distribución de la lluvia

Durante el período de investigación, se observaron patrones de distribución mensual de la lluvia diferentes a los de la normal climatológica 1991-2020 (Tabla 2, Figura 2). Aunque el total anual fue superior al histórico en 2018 y cercano en 2020 y 2021, las variaciones intra-anales de cada año modificaron la manera en que el suelo se recargó y agotó, afectando la dinámica de la humedad en el perfil.

En 2018, la precipitación acumulada alcanzó los 2467.4 mm, aproximadamente un 12 % por encima del promedio histórico. Los meses con menor cantidad de lluvia fueron julio y agosto, con 70.3 mm y 86.2 mm respectivamente, mientras que noviembre fue el mes más lluvioso, con 452.8 mm. Los incrementos respecto a la normal se distribuyeron en varios meses, con aumentos importantes en febrero, mayo, septiembre y noviembre. Solo en algunos meses, como julio, octubre y diciembre, se registraron reducciones marcadas. Este patrón, con lluvias superiores al histórico a lo largo del año, favoreció una recarga frecuente del suelo y contribuyó a mantener la humedad cercana a la capacidad de campo durante amplios períodos, reduciendo la duración de los episodios secos en el perfil.

Tabla 2. Precipitación mensual acumulada entre 2018 y 2021 y su variación respecto a la normal climatológica (1991-2020). Los colores rojos indican reducciones en la precipitación y los colores azules incrementos.

Mes	Normal Climatológica (1991-2020)	2018		2019		2020		2021	
		Precipitación acumulada (mm)	Variación (%)	Precipitación acumulada (mm)	Variación (%)	Precipitación acumulada (mm)	Variación (%)	Precipitación acumulada (mm)	Variación (%)
Enero	137.19	128.3	-6.48	33.6	-75.51	145.0	5.69	57.2	-58.31
Febrero	160.37	251.4	56.76	219.9	37.12	245.4	53.02	185.1	15.42
Marzo	236.33	235.1	-0.52	194.4	-17.74	174.7	-26.08	265.6	12.39
Abril	260.81	290.9	11.54	336.4	28.98	196.8	-24.54	189.7	-27.27
Mayo	204.21	295.4	44.65	162.0	-20.67	144.1	-29.44	193.5	-5.25
Junio	109.71	113.3	3.27	72.7	-33.73	139.9	27.52	221.6	101.99
Julio	83.69	70.3	-16.00	38.9	-53.52	143.3	71.23	91.2	8.98
Agosto	76.92	86.2	12.07	20.2	-73.74	285.5	271.18	243.7	216.84
Septiembre	143.31	190.3	32.79	199.7	39.35	122.7	-14.38	155.2	8.30
Octubre	271.74	237.1	-12.75	208.9	-23.13	166.2	-38.84	286.1	5.28
Noviembre	305.77	452.8	48.08	238.4	-22.03	196.8	-35.64	351.4	14.92
Diciembre	210.39	116.3	-44.72	213.5	1.48	209.1	-0.61	133.2	-36.69
Total anual	2200.44	2467.4	12.13	1938.6	-11.90	2169.5	-1.41	2373.5	7.86

En contraste, en 2019, la precipitación acumulada alcanzó los 1938.6 mm, inferior al promedio histórico. Se presentaron reducciones marcadas en enero, julio y agosto y de menor magnitud en junio, octubre y noviembre. Los aumentos se concentraron principalmente en febrero, abril y septiembre. Esto favoreció la ocurrencia de períodos más prolongados, con baja recarga del suelo en los periodos enero-febrero y julio-agosto, condiciones favorables para la expresión de la floración del cultivo de café (Ramírez *et al.*, 2010).

En 2020, la precipitación acumulada fue cercana a la normal climatológica, alcanzando los 2169.5 mm. Agosto y febrero concentraron gran parte del exceso de precipitación, con aumentos muy superiores al histórico, así como junio y julio. Posteriormente, septiembre, octubre y noviembre registraron reducciones importantes, si bien presentaron valores superiores al requerimiento hídrico del cultivo de café.

Durante 2021, la precipitación anual alcanzó 2373.5 mm, un valor ligeramente superior al promedio histórico. No obstante, se presentaron reducciones marcadas en enero, abril y diciembre, mientras que agosto y junio mostraron incrementos muy significativos, y noviembre, marzo y octubre se mantuvieron por encima del promedio. Así, el año presentó un inicio más seco, seguido por meses con mayor disponibilidad hídrica a mitad de año.

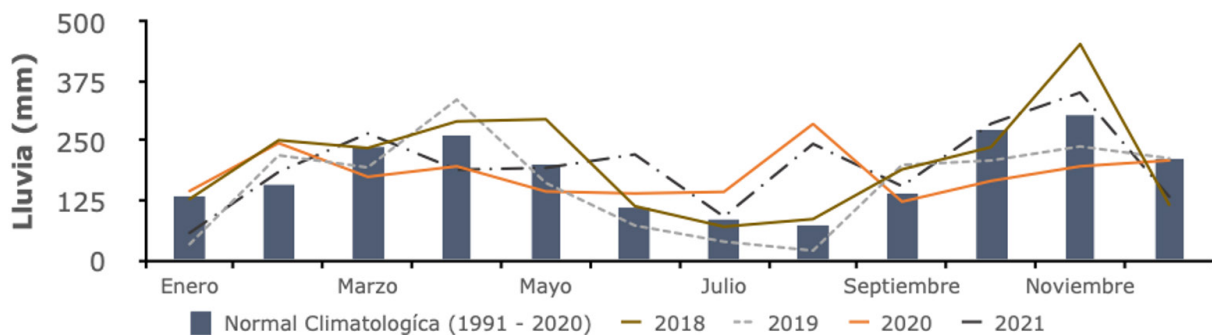


Figura 2. Valores de precipitación histórica mensual (1990-2020) y de los años 2018 a 2021, período en el que se realizó la investigación. Datos proporcionados por la Plataforma Agroclimática Cafetera.

En cuanto a las décadas de lluvia acumulada, se clasificaron 117 eventos que abarcaron el período comprendido entre el 20 de septiembre de 2018 y diciembre de 2021. De estos eventos, la clase A fue la más común, y MB fue la menos común (Tabla 3).

Tabla 3. Resumen estadístico de las clases de los eventos de lluvia acumulada por década.

Clasificación	número de eventos	Lluvia acumulada por década, mm				
		Promedio \pm error estándar	Máximo	Mínimo	Asimetría	Curtosis
Muy baja (MB)	18	4.03 \pm 0.81	9.20	0.00	0.10	-1.5
Baja (B)	36	23.23 \pm 1.24	37.90	10.40	-0.09	-1.34
Media (M)	23	58.04 \pm 1.92	79.60	42.60	0.21	0.13
Alta (A)	40	118.08 \pm 5.63	189.10	80.50	2.26	-0.83

En la clase MB se presentaron cuatro períodos en los que estos eventos fueron seguidos, uno en 2018, tres en 2019 y uno en 2021. El de 2018 fue desde la segunda hasta la tercera década de diciembre, con un acumulado de lluvia de 7.1 mm, seguido por el primero de 2019, que fue desde la segunda hasta la tercera de enero con 7.9 mm. Como se observa en la [Tabla 3](#), estos dos eventos fueron interrumpidos por una década de B con 29.9 mm. El segundo de 2019 se dio en la segunda y tercera décadas de julio, con una lluvia acumulada de 9.2 mm, y el tercero de 2019, destacado por ser el más extenso, se prolongó por 30 días, desde la segunda década de agosto hasta la primera de septiembre de 2019, con un acumulado de lluvia de 0.7 mm. Estos eventos se dieron en los periodos de menor precipitación, que corresponden a los periodos secos ya definidos de la zona de estudio, asociados al movimiento de la ZCIT ([Jaramillo et al., 2011](#)).

En la clase B se registraron nueve eventos consecutivos: los dos primeros en 2019, del tercero al quinto en 2020 y los cuatro restantes en 2021. Los eventos de 2019 ocurrieron entre la primera y segunda décadas de junio, con una lluvia acumulada de 65.2 mm, y el segundo entre la tercera década de julio y la primera de agosto, con 29.3 mm. Se destaca que fue un período prolongado de B, ya que, hasta septiembre estas, décadas fueron seguidas por períodos de precipitación MB ([Tabla 4](#)). Los eventos de 2020 comenzaron en las dos primeras décadas de enero (con 43.9 mm) y febrero (con 46 mm), seguidas por un período de cuatro décadas entre septiembre y octubre, con 113 mm de lluvia acumulada. Los eventos de 2021 se dieron en febrero (46.6 mm), entre junio y julio (43.2 mm), entre julio y agosto (29.1 mm), y en septiembre (80.1 mm). Los periodos enero-febrero y junio-agosto se ajustan a los meses de menor precipitación en la zona central de Colombia, tanto a la primera como a la segunda temporada seca del año, tal como fueron descritos por [Jaramillo et al. \(2011\)](#). Entretanto lo sucedido en los periodos de septiembre y octubre se considera como anómalo, pues no corresponde a épocas secas según los reportes históricos.

Tabla 4. Clasificación de la lluvia acumulada cada diez días (décadas)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Año	I I	I I	I I	I I	I I	I I	I I	I I	I I	I I	I I	I I
2018												
2019												
2020												
2021												
Clasificación de lluvia acumulada en 10 días					Color							
Muy baja (pp acumulada ≤10 mm)												
Baja (>10 pp acumulada ≤40 mm)												
Media (>40 pp acumulada ≤80 mm)												
Alta (pp acumulada >80 mm).												

La clase M presentó un total de cuatro periodos consecutivos. El primero ocurrió entre noviembre y diciembre de 2019 ([Tabla 4](#)), con 174.2 mm de lluvia acumulada en tres décadas. El siguiente se dio en mayo de 2020 (131.8 mm), el tercero entre marzo y abril de 2021 (121.6 mm) y el último en septiembre de 2021 (120.8 mm).

En la clase A se presentaron ocho eventos distribuidos en los cuatro años. Los del 2018 se registraron entre noviembre y la primera década de diciembre ([Tabla 6](#)), con un total de 556.6 mm de lluvia acumulada. En 2019, se presentaron dos periodos de eventos consecutivos: el primero desde la segunda década de marzo hasta la segunda de abril de 2019, con 451.4 mm; y el siguiente en septiembre, con 194.4 mm. En 2020, hubo un solo evento consecutivo en agosto, con 299.4 mm. Finalmente, en 2021 se observaron cuatro eventos: entre febrero y marzo, con 293.1, seguido por el de abril-mayo (183.2 mm), el de agosto (221.9 mm) y el de septiembre-noviembre (295.5 mm). Estos periodos de alta precipitación coinciden con los picos de lluvia que se registran en la zona de estudio ([García, 2013](#)), a excepción del único evento que se dio en 2020.

Humedad del suelo

En el análisis diario, las tensiones hídricas del suelo variaron entre 0 y -89 kPa, donde la primera tensión se relaciona con un suelo extremadamente húmedo y la segunda con un suelo seco ([Barney et al., 2009](#)). En cuanto al suelo húmedo, la profundidad de 25 cm fue la que presentó el mayor número de días con el suelo cercano al grado de saturación. Hubo 20 días con tensiones inferiores a -4.0 kPa, y esta profundidad fue la única en la que se presentaron días consecutivos con esta condición; a 40 cm se registraron seis días y, a 60 cm, dos—en ambos casos, eventos aislados. Los eventos de interés para la profundidad de 25 cm se dieron en 2018, el primero en septiembre (del 4 al 6), en el que la tensión hídrica fue de 0.0 kPa; y el segundo en diciembre (del 3 al 7), en el que tres días presentaron tensiones de 0.0 kPa y dos mostraron -4.0 kPa. Para las tres profundidades se destaca el 5 de abril de 2019, el único día en el que la tensión hídrica del suelo fue de 0.0 kPa en las tres profundidades.

En suelo seco con tensión hídrica < -50 kPa, la cantidad de días fue similar en las tres profundidades: de 66 días a 25 cm, de 69 a 40 cm y de 62 a 60 cm. Se destaca la temporada del 28 de enero al 7 de febrero de 2019, en la que el suelo presentó tensiones altas en las tres profundidades, con valores que fueron hasta -68 kPa a 25 cm, -75 kPa a 40 cm y -76 kPa a 60 cm. También se destaca la temporada del 19 de julio al 17 de septiembre de 2019; el 9 de septiembre, el suelo registró las mayores tensiones hídricas del periodo evaluado, con tensiones de -82, -83 y -89 kPa a 25, 40 y 60 cm de profundidad respectivamente. Lo anterior puede asociarse con una disminución en la capacidad de almacenamiento de agua en las capas más profundas del perfil del suelo, común en los suelos *typic melanudands* ([Lince, 2021](#)), sumado a que la baja retención de humedad es una característica común en suelos arenosos y de materia orgánica baja a media, como son los del sitio de estudio ($70.39 \pm 0.57\%$ y $7.69 \pm 0.21\%$ respectivamente).

En el análisis agrupado por profundidades, las tensiones hídricas del suelo variaron entre 0 y -89 kPa ([Tabla 5](#)). En promedio, la profundidad de 25 cm fue la de menor humedad, con los valores más altos de tensión hídrica, tanto en la media como en la mediana, mientras que la profundidad más húmeda fue 60 cm según la media y 40 cm según la mediana, con datos que no se ajustan a una distribución normal (KS $p=0$). En el análisis diario de los datos, se encontró una diferencia significativa en las tensiones hídricas entre las tres profundidades evaluadas (KW $p=7.21E-7$). Se destaca la diferencia entre la tensión hídrica a 25 cm y a 40 y 60 cm, como se evidencia en el traslape de las muescas en la [Figura 4](#).

Esta variación en la humedad del suelo se puede atribuir a varios factores, entre ellos la capacidad de infiltración de agua en el suelo, que determina la velocidad de entrada de la precipitación en las diferentes capas del suelo (Liu *et al.*, 2019; Wen *et al.*, 2024), fenómeno que ha sido ampliamente reportado en la literatura (da Silva-Dias *et al.*, 2024; Wen *et al.*, 2024; Ran *et al.*, 2025). Otro factor es el asociado al balance hídrico: la parte superior del perfil, al estar expuesta a mayores ganancias a través de la lluvia y a pérdidas por la evapotranspiración, refleja mayores cambios en comparación con las capas profundas (Parkin, 2008; Crichlow *et al.*, 2024). Por ende, el proceso de secado del suelo dura más a mayor profundidad (Rao & Saikranthi, 2025), condición que favorece la regulación hídrica de las plantas de café en etapa productiva, mayores de dos años y con raíces profundas, al tiempo que desfavorece a las plantas jóvenes (menores de 1 año), cuyas raíces están en la parte superficial del perfil y cuyo acceso al agua disponible en los perfiles subsecuentes se ve limitado. Si el agua presente en las primeras capas del perfil es insuficiente para la planta, esta puede atravesar diferentes etapas de retraso en su crecimiento (Lince Salazar *et al.*, 2024).

En cuanto a la distribución, más del 80 % de las lecturas se encuentra en el rango de 0 a -33 kPa, cerca del 8 % entre -33 y -40 kPa, y menos del 3 % en valores iguales o inferiores a -40 kPa (Figura 3). Esto indica que, durante la mayor parte del tiempo en que se realizó el estudio, el suelo permaneció en un rango de humedad adecuado para el desarrollo de las plantas (Ramírez *et al.*, 2013; Lince Salazar *et al.*, 2024).

Tabla 5. Resumen estadístico de la tensión hídrica del suelo a tres profundidades del perfil

Profundidad en el perfil	Número de datos	Promedio (-kPa)	Mediana (-kPa)	Error estándar	Mínimo (-kPa)	Máximo , (-kPa)	Sesgo E	Curtosis E
25 cm	2140	23.54 ± 0.34	19.00	0.34	0.00	84.00	33.67	28.21
40 cm	1456	22.41 ± 0.41	17.50	0.41	0.00	84.00	28.55	23.24
60 cm	1157	21.17 ± 0.40	18.00	0.39	0.00	89.00	31.97	39.23

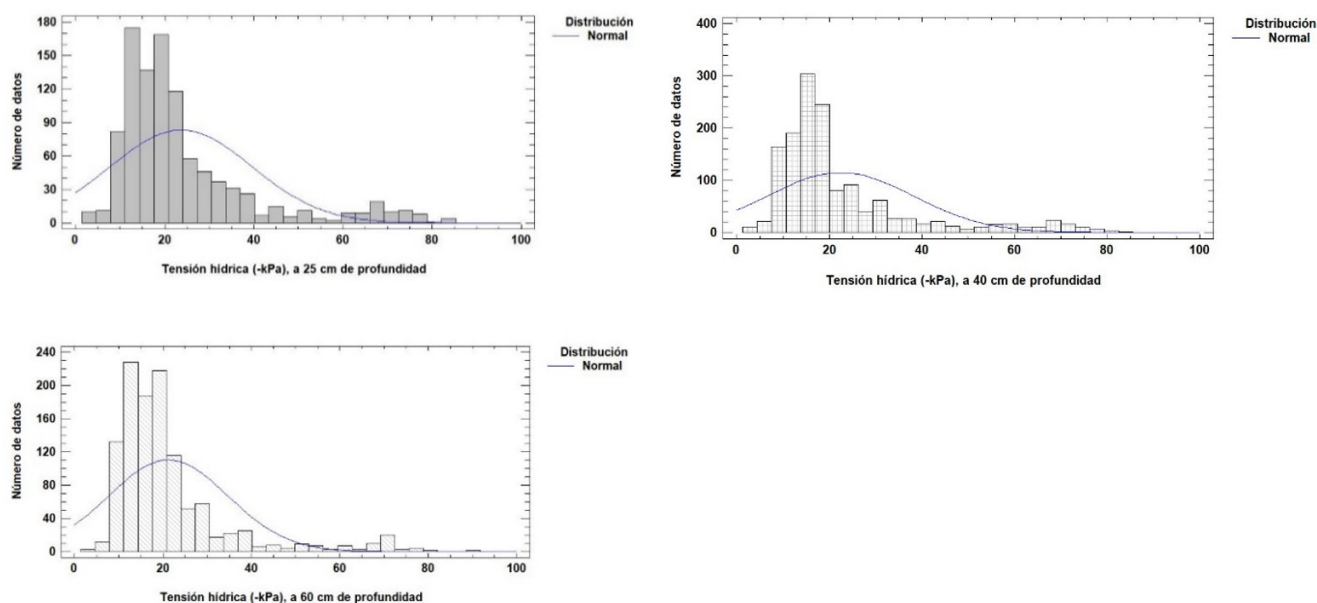


Figura 3. Histogramas de distribución de frecuencias para la tensión hídrica del suelo a diferentes profundidades, con $n = 2140$ para 25 cm, $n = 1456$ para 40 cm y $n = 1157$ para 60 cm. Cada dato corresponde al valor diario de la tensión hídrica registrada en los tensiómetros a las 6:15 a.m. entre septiembre de 2018 y diciembre de 2011, con un máximo de tres datos por día.

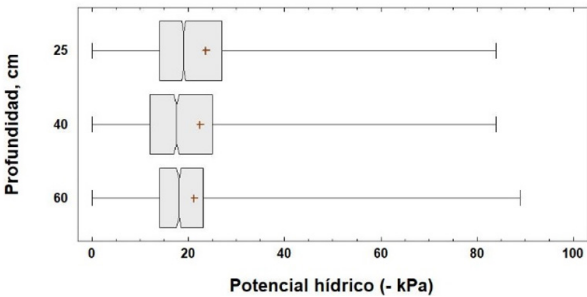


Figura 4. Gráfico de caja y bigotes para la tensión hídrica del suelo a las tres profundidades entre septiembre de 2018 y diciembre de 2011. La cruz indica la media y la muesca la mediana.

En cuanto a la distribución de la humedad del suelo por décadas, a 25 cm—que es donde se encuentra el mayor número de raíces de la planta de café y es la profundidad que se tiene en cuenta para recomendar actividades culturales ([Rendón & Giraldo, 2019](#))—se identificaron períodos críticos para la condición de alta humedad (<-15kPa) por exceso de agua entre la segunda década de octubre y la primera de diciembre de 2018, con valores mínimos de -3.83 kPa, y entre las últimas décadas de marzo y abril de 2019, con tensiones mínimas de 0.0 kPa. Por otro lado, en la segunda y tercera décadas de julio de 2021, las condiciones de lluvia fueron MB precedida por B y B precedida por MB, con tensiones hídricas del suelo entre -26.5 y -29.7 kPa, lo que indica que la humedad estaba en el rango adecuado para el desarrollo de los cultivos ([Lacerda et al., 2022](#); [Phogat et al., 2024](#)).

Adicionalmente, se identificó la primera década de agosto como una temporada de suelo seco (menor -35 kPa), común en 2019, 2020 y 2021 ([Tabla 6](#)), con valores máximos de tensión hídrica de -58.0 kPa en 2019. Además, hubo otros dos períodos críticos en 2019, entre enero y febrero y entre julio y agosto, donde las tensiones máximas fueron de -66.8 a -71.7 kPa. En otro periodo más corto, que ocurrió en 2021 entre la última década de enero y la primera de febrero, se observó un potencial mátrico máximo de -57.7 kPa, lo cual coincide con la época históricamente marcada para floración ([Ramírez et al., 2010](#); [Cañón, 2018](#)). Se considera que otras décadas con esta condición no son críticas para el desarrollo del cultivo, pues se limitaron a un solo evento.

Tabla 6. Clasificación de la humedad del suelo de y su relación con la lluvia acumulada decadal

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	I II III I	I II III I	I II III I	I II III I	I II III I	I II III I	I II III I	I II III I	I II III I	I II III I	I II III I	I II III I
2018									II III	II III	II III	II III
2019	II III	II III	II III	II III	II III	II III	II III	II III	II III	II III	II III	II III
2020	II III	II III	II III	II III	II III	II III	II III	II III	II III	II III	II III	II III
2021	II III	II III	II III	II III	II III	II III	II III	II III	II III	II III	II III	II III
Tensión hídrica superior a -15 kPa (suelo muy húmedo)									II III			
Tensión hídrica entre -33 y -15 kPa (suelo con humedad adecuada para los cultivos)									II III			
Tensión hídrica inferior a -40 kPa (suelo seco)									II III			

Relación entre la humedad del suelo y la lluvia

En el resumen estadístico, donde se relacionan la humedad del suelo, expresada en valores de tensión hídrica, y los eventos decádicos de lluvia ([Tabla 7](#)), se observa que, para las tres profundidades evaluadas, el suelo presentó menor humedad en los eventos precedidos por décadas MB, con condiciones de suelo más seco en los eventos MB y B, como se registró en la primera década de septiembre de 2019, con tensiones máximas de -82, -83 y -89 kPa a 25, 40 y 60 cm de profundidad y una lluvia acumulada de 0.6 mm.

Según las medianas, estas humedades, generadas por la lluvia actual y precedida, son estadísticamente diferentes al resto de los grupos analizados ([Figura 5](#)). Los eventos en los que el suelo tuvo mayor humedad (>-15 kPa), fueron los de lluvia A precedida por A y M, con promedios de potencial hídrico entre -11.70 ± 1.3 y -15.01 ± 2.18 kPa. En esta condición se identificaron períodos críticos en noviembre de 2018 ([Tabla 7](#)) y los últimos diez días de marzo y abril de 2019, con tensiones mínimas de 0.0 kPa. Los demás eventos presentaron potenciales mátricos entre -15 y -33 kPa, que se consideran en el rango óptimo para el desarrollo del cultivo.

La influencia de la humedad del suelo antecedente y la cantidad de lluvia relacionada con la humedad actual del suelo también ha sido mencionada por otros investigadores, quienes han incluido esta condición en los modelos de predicción, mejorando el desempeño al aumentar la previsibilidad y reducir la incertidumbre ([Han et al., 2024](#)). Sin embargo, estos resultados difieren de los presentados por [Cañón \(2018\)](#), los cuales se obtuvieron entre junio de 2017 y enero de 2018 para este mismo sitio. Este autor reportó que, independientemente de la condición de humedad, la percolación es lineal y similar entre diferentes condiciones de riego y seco. La pendiente del modelo estuvo entre 0.82 y 0.89, indicando que de 100 mm de lluvia llegan a la superficie del suelo como lluvia neta y que el 86 % se percola. La diferencia entre los dos estudios puede deberse a lo reportado por [Lauzon et al. \(2004\)](#), según los cuales la diferencia en el tamaño de los periodos analizados influye en los resultados del análisis de la humedad del suelo; para periodos inferiores, puede no encontrarse diferencia en comparación con intervalos de hasta 512 días.

Se encontró que, una vez que el suelo llega a tensiones hídricas < -50 kPa, se requiere de una lluvia acumulada en 10 días superior a los 80 mm para alcanzar valores cercanos a la capacidad de campo, tal como se observa en la [Figura 6](#), que también muestra cómo varía la humedad del suelo tanto por la cantidad de lluvia de la década actual como por la de la década que la precede. Estos resultados son similares a los presentados por [Cañón \(2018\)](#) para este mismo sitio, quien indicó que solo ocurre percolación en el suelo cuando la lluvia neta es igual o superior a 57, 53 y 49 mm para las parcelas seco, riego 1 y riego 2 respectivamente. Los hallazgos también se relacionan con lo reportado para otros sitios ([Ran et al., 2025](#); [da Silva-Dias et al., 2024](#); [Liang et al., 2024](#); [Calvo-Alvarado et al., 2012](#)), donde se ha de mostrado la influencia de la intensidad y la duración de la lluvia en la humedad de las diferentes profundidades del suelo, coincidiendo en que se requieren eventos de mayor magnitud y duración para que las capas profundas lleguen a ganar humedad producto de la precipitación. Lo anterior indica que la humedad del suelo depende de la cantidad de lluvia y de la manera en que esta se distribuye en el tiempo, coincidiendo con lo propuesto por [Peña et al. \(2012\)](#), i.e., para determinar el riesgo que representa la lluvia para la producción del cultivo de café, es necesario conocer su distribución en el tiempo.

Tabla 7. Tensión hídrica del suelo en entre junio de 2018 y diciembre de 2021 para las diferentes clasificaciones de la lluvia y el evento que la precede

Año	Condición de lluvia	Número de eventos	Tensión hídrica del suelo, -kPa			
			Lluvia acumulada décadas. mm	Profundidad: 25 cm	Profundidad: 40 cm	Profundidad: 60 cm
			Promedio ± error estándar			
2018	MB-MB	1	0.80	59.00	51.75	—
	A-MB	1	189.10	20.78	23.78	—
	M-B	1	46.80	11.25	19.75	—
	A-M	2	169.20 ± 14.40	8.00 ± 2.00	16.83 ± 1.54	—
	MB-A	2	4.95 ± 1.35	27.79 ± 1.54	29.60 ± 1.22	—
	B-A	1	29.70	14.33	21.33	—
	A-A	3	133.60 ± 27.67	5.96 ± 1.63	13.93 ± 1.35	—
2019	MB-MB	3	2.80 ± 2.51	65.29 ± 6.81	64.52 ± 2.51	71.48 ± 2.08
	B-MB	3	21.97 ± 5.87	48.34 ± 12.36	50.99 ± 4.88	42.10 ± 15.13
	A-MB	2	93.00 ± 11.20	54.96 ± 2.12	60.56 ± 3.01	63.63 ± 1.63
	MB-B	4	3.63 ± 2.20	41.10 ± 8.17	40.19 ± 3.08	44.03 ± 11.50
	B-B	2	26.20 ± 7.40	37.98 ± 20.02	42.38 ± 6.74	44.08 ± 27.33
	A-B	4	90.30 ± 8.79	20.86 ± 1.91	19.77 ± 1.81	21.77 ± 3.38
	B-M	2	22.95 ± 8.65	24.81 ± 6.19	23.27 ± 2.88	21.87 ± 5.20
	M-M	3	62.87 ± 8.42	16.61 ± 1.73	14.54 ± 1.82	14.16 ± 1.59
	A-M	2	98.85 ± 4.65	18.24 ± 5.01	15.79 ± 2.37	15.75 ± 5.50
	B-A	3	20.37 ± 0.58	22.80 ± 5.55	23.00 ± 4.11	25.82 ± 9.75
	M-A	4	63.38 ± 2.45	15.72 ± 1.01	14.35 ± 0.85	14.17 ± 0.56
	A-A	4	115.28 ± 21.24	14.01 ± 2.96	13.88 ± 2.14	18.79 ± 5.19
2020	B-MB	1	10.40	32.44	29.58	29.08
	M-MB	2	59.15 ± 3.35	18.68 ± 1.64	19.06 ± 0.93	18.61 ± 0.61
	A-MB	2	146.50 ± 13.30	20.76 ± 6.43	16.82 ± 3.27	15.61 ± 4.03
	MB-B	1	5.60	24.53	26.70	24.80
	B-B	5	23.78 ± 4.07	26.75 ± 3.42	23.73 ± 2.41	22.60 ± 2.040
	A-B	7	123.27 ± 16.11	18.57 ± 1.52	17.49 ± 1.90	17.45 ± 1.18
	MB-M	2	4.15 ± 4.15	28.23 ± 8.04	24.20 ± 2.60	23.34 ± 4.56
	B-M	3	25.70 ± 5.25	19.35 ± 2.17	18.91 ± 2.42	17.40 ± 2.02
	M-M	1	69.30	28.11	25.50	26.25
	A-M	1	82.40	15.19	13.29	14.21
	MB-A	2	6.75 ± 0.25	17.13 ± 0.59	16.69 ± 2.15	16.33 ± 0.08
	B-A	4	24.68 ± 2.00	20.84 ± 2.26	18.80 ± 1.25	17.84 ± 1.26
	M-A	4	50.53 ± 4.90	15.55 ± 1.33	14.36 ± 1.29	14.3 ± 0.31
	A-A	1	139.60	13.29	12.07	12.21
2021	MB-MB	1	0.40	41.38	37.64	34.93
	B-MB	2	20.30 ± 6.70	42.75 ± 14.96	41.50 ± 4.61	39.70 ± 12.07

MB-B	1	8.40	29.67	29.00	28.67
B-B	5	23.38 ± 2.91	26.09 ± 3.26	25.47 ± 3.13	26.08 ± 4.10
M-B	2	60.00 ± 3.80	18.70 ± 2.75	16.43 ± 2.40	17.26 ± 2.60
A-B	3	98.33 ± 9.55	16.26 ± 2.92	16.51 ± 2.58	17.77 ± 3.50
MB-M	1	2.70	25.24	23.00	22.36
B-M	2	20.70 ± 8.10	22.12 ± 1.93	18.00 ± 1.29	18.98 ± 1.52
M-M	2	64.30 ± 0.30	18.57 ± 2.57	15.64 ± 1.38	16.67 ± 2.03
A-M	3	117.93 ± 17.82	13.59 ± 0.62	11.46 ± 1.25	12.95 ± 0.41
B-A	3	25.80 ± 5.62	16.62 ± 2.83	14.71 ± 2.13	15.36 ± 2.35
M-A	4	51.95 ± 3.25	15.52 ± 0.56	12.91 ± 1.11	13.87 ± 0.63
A-A	5	112.46 ± 12.34	12.98 ± 0.70	11.09 ± 1.34	12.55 ± 0.70

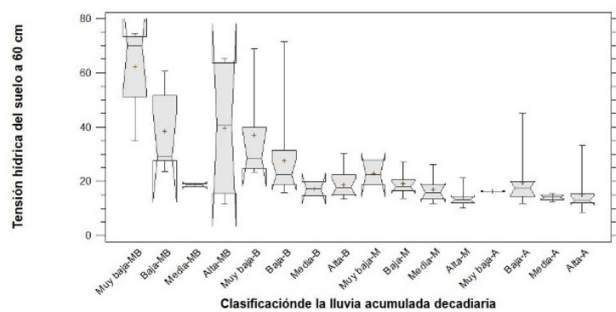
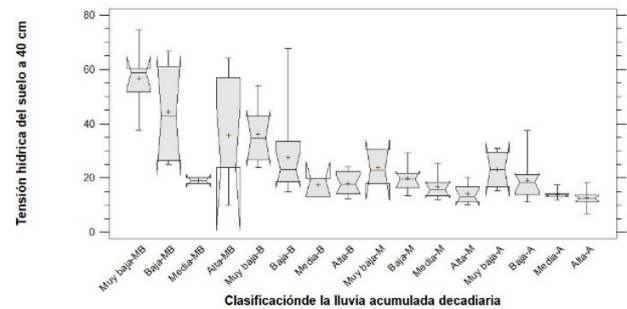
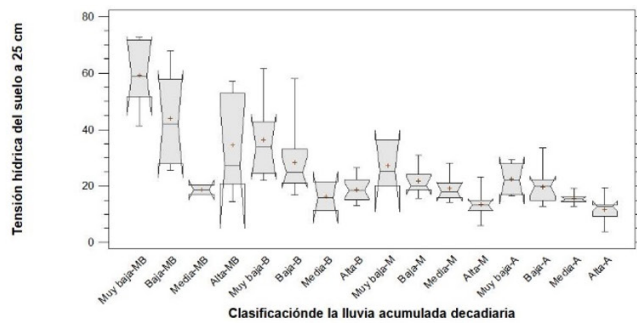


Figura 5. Gráfico de caja y bigotes para la tensión hídrica del suelo (-kPa) a las tres profundidades, según los eventos decádicos de lluvia y el evento que los precede. Mediciones entre septiembre de 2018 y diciembre de 2011. La cruz indica la media y la muesca la mediana. MB: muy baja; B: baja; M: media; A: alta.

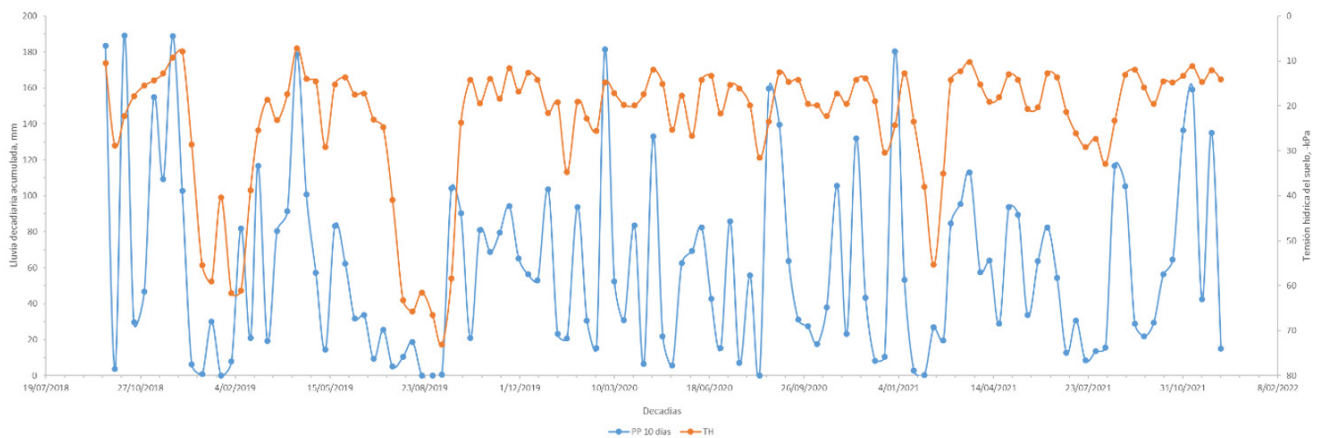


Figura 6. Lluvia acumulada y tensión hídrica del suelo promedio en períodos decádicos entre septiembre de 2018 y diciembre de 2021

CONCLUSIONES

El suelo presentó menor humedad en los eventos precedidos por décadas de lluvia muy baja. Además, una vez que el suelo llega a tensiones hídricas < -50 kPa (más seco), se requiere de una lluvia decádica > 80 mm para que alcance valores cercanos a la capacidad de campo (-33 kPa).

En cuanto a la aplicación de riego suplementario, en ninguno de los años era necesario para el caso de estudio, ya que los períodos de suelo seco (< -40 kPa) coincidieron con la maduración de yemas florales (latencia), necesaria para promover una floración concentrada.

Es necesario realizar investigaciones que contemplen la intensidad de la lluvia (i_{30}) en diferentes ventanas de tiempo (inferiores a 24 horas), dado que estudios en otros cultivos indican que este parámetro condiciona la humedad del suelo.

También es preciso investigar lotes que tengan plantas en etapa de levante, ya que el suelo presenta una cobertura diferente, lo que determina en gran medida la dinámica de la humedad del suelo y su respuesta a los eventos de lluvia.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Luz Adriana Lince Salazar: Conceptualización; curación de datos; adquisición de fondos; investigación; metodología; laboratorio; redacción – borrador original; redacción – revisión y edición.

Ninibeth Sarmiento Herrera: Curación de datos; investigación; metodología; redacción – borrador original; redacción – revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras expresan sus agradecimientos a Cenicafé – Federación Nacional de cafeteros de Colombia, por el apoyo financiero en la investigación. A los integrantes de las disciplinas de Suelos y Agroclimatología de Cenicafé, y por su apoyo con el trabajo en campo a Jaroliver Cardona, Mirian Cañón y Daniel Antonio Franco Chaura.

REFERENCIAS

- Barney, J. N., Mann, J. J., Kyser, G. B., Blumwald, E., Van Deynze, A., & DiTomaso, J. M. (2009). Tolerance of switchgrass to extreme soil moisture stress: ecological implications. *Plant Science*, 177(6), 724-732. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2009.09.003>
- Brocca, L., Ciabatta, L., Massari, C., Moramarco, T., Hahn, S., Hasenauer, S., Kidd, R., Dorigo, W., Wagner, W., & Levizzani, V. (2014). Soil as a natural rain gauge: Estimating global rainfall from satellite soil moisture data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(9), 5128-5141. <https://doi.org/10.1002/2014jd021489>
- Calvo-Alvarado, J., Jiménez-Rodríguez, C., & de Saá-Quintana, M. (2012). Intercepción de precipitación en tres estadios de sucesión de un Bosque húmedo Tropical, Parque Nacional Guanacaste, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 9(22), ág-1. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v9i22.355>
- Cañón H., M. (2018). *Determinación de las necesidades hídricas en un cultivo de café, en etapa productiva, con base en el conocimiento del balance hídrico* [Tesis de maestría, Universidad de Manizales].
- Crichlow, A., Roopnarine, R., Eudoxie, G., & Pinongcos, F. (2024). Nature-based solutions for regulating moisture content in an expansive clay soil. *Nature-Based Solutions*, 5, 100125. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.nbsj.2024.100125>
- da Silva-Dias, R., Raposo-Díaz, X., García-Tomillo, A., & López-Vicente, M. (2024). Response time of soil moisture to rain in a vineyard with permanent cover. *Geoderma*, 444, 116866. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116866>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC) (1986). *Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento de Quindío*. FNC.
- García, J.C. (2013). *Dominio de recomendación y representatividad de las estaciones experimentales del Centro Nacional de Investigación en Café Cenicafé*. Universidad de Caldas.
- Han, Y., Wang, G., Xiong, L., Xu, Y., & Li, S. (2024). Rainfall effect on soil respiration depends on antecedent soil moisture. *Science of the Total Environment*, 926, 172130. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172130>
- Hlaváčiková, H., Novák, V., Kostka, Z., Danko, M., & Hlavčo, J. (2018). The influence of stony soil properties on water dynamics modeled by the HYDRUS model. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66(2), 181-188. <https://doi.org/10.1515/johh-2017-0052>
- Huisman, J. A., Sperl, C., Bouten, W., & Verstraten, J. M. (2001). Soil water content measurements at different scales: accuracy of time domain reflectometry and ground-penetrating radar. *Journal of Hydrology*, 245(1-4), 48-58. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00336-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00336-5)
- Jaramillo R., A., Baldión R., J. V., Guzmán M., O. (1999). El evento cálido del Pacífico y el cultivo del café. *Agronomía (Colombia)*, 9(2), 13-17.
- Jaramillo, Á., Ramírez, V., & Arcila, J. (2011). *Patrones de distribución de la lluvia en la Zona Cafetera*. Centro Nacional de Investigaciones de café (Cenicafé). <https://doi.org/10.38141/10779/0410>
- Kokila, A., Nagarajaiah, C., Hanumanthappa, D. C., Shivanna, B., Sathish, K., & Mahadevamurthy, M. (2024). Effect of tree canopy cover on soil moisture dynamics in different agroforestry systems under semi-arid condition. *International Journal of Environmental Climate Change*, 14(9), 485-489. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2024/v14i94432>
- Lacerda, K. S., Vargas, R. C., Ribeiro, K. M., Dias, M. D. S., Ribeiro, K. D., & Abreu, D. D. (2022). Load-bearing capacity and critical water content of the coffee plantation soil with management in full sun and shaded. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 46, e0220051. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220051>
- Lauzon, N., Anctil, F., & Petrinovic, J. (2004). Characterization of soil moisture conditions at temporal scales from a few days to annual. *Hydrological Processes*, 18(17), 3235-3254. <https://doi.org/10.1002/hyp.5656>
- Lince Salazar, L. A. (2021). Capacidad de almacenamiento de agua en suelos cultivados en café y otras propiedades edáficas relacionadas. *Revista Cenicafé*, 72(1), e72101. <https://doi.org/10.38141/10778/72101>
- Lince Salazar, L. A., & Khalajabadi, S. S. (2023). Propiedades hidrofísicas de suelos de la zona cafetera colombiana y su relación con el material parental. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 14(1), 51-84. <https://doi.org/10.22490/21456453.5891>

- Lince Salazar, L. A., Sadeghian-Khalajabadi, S., & Sarmiento Herrera, N. G. (2024). Evaluación de parámetros relacionados con el crecimiento de plantas de café (*Coffea arabica* L.) en respuesta al déficit hídrico del suelo. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 11-34. <https://doi.org/10.22490/21456453.6805>
- Liang, Z., Chen, X., Wang, C., & Zhang, Z. (2024). Response of soil moisture to four rainfall regimes and tillage measures under natural rainfall in red soil region, southern China. *Water*, 16(10), 1331. <https://doi.org/10.3390/w16101331>
- Liu, Y., Cui, Z., Huang, Z., López-Vicente, M., & Wu, G. L. (2019). Influence of soil moisture and plant roots on the soil infiltration capacity at different stages in arid grasslands of China. *Catena*, 182, 104147. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104147>
- Parkin, G. W. (2008). Water budget in soil. EN W. Chesworth (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science* (pp. 811-813). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3995-9_622
- Peña, A. J., Ramírez, V. H., Valencia, J. A., & Jaramillo-Robledo, A. (2012). *La lluvia como factor de amenaza para el cultivo del café en Colombia*. <https://doi.org/10.38141/10779/0415>
- Phogat, V., Petrie, P. R., Collins, C., & Bonada, M. (2024). Plant-available water capacity of soils at a regional scale: Analysis of fixed and dynamic field capacities. *Pedosphere*, 34(3), 590-605. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.11.003>
- Poveda, G., & Mesa, O. (1999). La corriente de chorro superficial del Oeste ("del Chocó") y otras dos corrientes de chorro en Colombia: climatología y variabilidad durante las fases del ENSO. *Revista Académica Colombiana de Ciencia*, 23(89), 517-528.
- Poveda, G., Jaramillo, Á., Gil, M. M., Quiceno, N., & Mantilla, R. I. (2001). Seasonality in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia. *Water Resources Research*, 37(8), 2169-2178. <https://doi.org/10.1029/2000WR900395>
- Poveda, G., Waylen, P. R., & Pulwarty, R. S. (2006). Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234(1), 3-27. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.10.031>
- Ramírez B., V. H., Arcila P., J., Jaramillo R., A., Rendón S., J. R., Cuesta G., G., Menza F., H. D., Mejía M., C. G., Montoya, D. F., Mejía M., J. W., Torres N., J. C., Sánchez A., P. M., Baute B., J. E., & Peña Q., A. J. (2010). Floración del café en Colombia y su relación con la disponibilidad hídrica, térmica y de brillo solar. *Cenicafé*, 61(2), 132-158.
- Ramírez B., V. H., Jaramillo R., Á., & Arcila P., J. (2010). Rangos adecuados de lluvia para el cultivo de café en Colombia. *Avances Técnicos Cenicafé*, (395), 1-8. <https://doi.org/10.38141/10779/0395>
- Ramírez, V. H., Jaramillo R., A., & Arcila P., J. (2013). Factores climáticos que intervienen en la producción del café en Colombia. En CENICAFE (Eds.), *Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura* (pp. 205-237). FNC, CENICAFÉ.
- Ran, B., Xing, Z., Fang, J., Yang, Y., He, Y., Li, X., Liu, X., & Liu, G. (2025). Analysis of soil moisture dynamics and its response to rainfall in the Mu Us Sandy Land. *Water*, 17(1), 105. <https://doi.org/10.3390/w17010105>
- Rao, B. K., & Saikranthi, K. (2025). Observational evidence of impact of heavy rainfall events on surface energetics and soil variables over a tropical station Tirupati. *Atmospheric Research*, 315, 107831. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107831>
- Rendón S., J. R., & Giraldo H., A. (2019). Distribución de raíces en café variedad Castillo® bajo dos arreglos espaciales. *Revista Cenicafé* 70(1), 7-17. <https://doi.org/10.38141/10778/70101>
- Teuling, A. J., & Troch, P. A. (2005). Improved understanding of soil moisture variability dynamics. *Geophysical Research Letters*, 32(5). <https://doi.org/10.1029/2004GL021935>
- Urrea, V., Ochoa, A., & Mesa, O. (2019). Seasonality of Rainfall in Colombia. *Water Resources Research*, 55(5), 4149-4162. <https://doi.org/10.1029/2018WR023316>
- Wang, J., & Bras, R. L. (2011). A model of evapotranspiration based on the theory of maximum entropy production. *Water Resources Research*, 47(3), W03521. <https://doi.org/10.1029/2010WR009392>
- Wen, Y., Liu, B., Yu, Q., Xu, Y., Lin, L., Zhang, B., Li, T., Wu, W., & Song, Q. (2024). Response of soil moisture to prewinter conditions and rainfall events at different distances to gully banks in the Mollisol region of China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 49(6), 1858-1868. <https://doi.org/10.1002/esp.5803>

