



CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN

PROGRAMA DE POSGRADO

Efecto del establecimiento de una obra de cosecha de agua sobre el balance hídrico de suelo: estudio de caso en la parte media de la cuenca río Reventazón, Costa Rica

Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de Posgrado como requisito para optar al grado de

MAGISTER SCIENTIAE

en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

Joseling Adriana Reyes Area

Turrialba, Costa Rica

2024

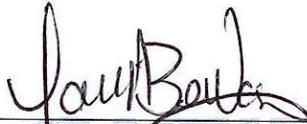
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero de la estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

FIRMANTES:



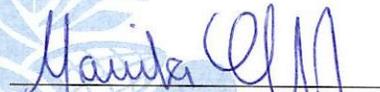
Ney Ríos Ramírez, M.Sc.
Director de tesis



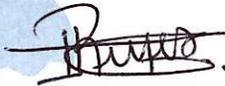
Laura Benegas Negri, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Néstor López Nolasco, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Mariela Leandro Muñoz, Ph.D.
Decana, Escuela de Posgrado



Joseling Adriana Reyes Area
Candidata

Agradecimiento

A Dios por darme la oportunidad de poder cumplir uno de mis anhelos profesionales, y por darme salud y sabiduría para culminar esta meta.

A mis apreciados padres, José Reyes y Jamileth Area, quienes, a través de su ejemplo, me han enseñado que los sueños se cumplen. Todos mis logros han sido gracias a su apoyo y motivación.

A mis hermanas, Jeyling, Nguyen y Dayana, que a pesar de estar lejos siempre están motivándome a seguir adelante. A mi amada abuelita María por sus sabios consejos y palabras de aliento.

A mi esposo, René Jarquín, por apoyarme y motivarme a seguir adelante en los momentos que sentía que ya no podía, gracias corazón por creer en mí, eres una persona digna de admirar y es un privilegio poder tener la compañía de un ser tan especial y único como vos.

A mi mejor amiga Lizmayling Chávez, por sus consejos y apoyo desinteresado y sincero. Agradezco tu amistad, tus palabras de aliento y el saber que siempre puedo contar contigo.

A mis amigas, Adania Matus, Jeymi Flores y Cristina Fueres, por su amistad y apoyo continuo en este proceso.

A mis compañeros de maestría, Guido Chaparro y Dany Benavidez (doble colega), por el enorme apoyo que me brindaron en la etapa de campo.

A mi profesora, Dra. Ingrid Úbeda, por motivarme a seguir adelante en mi carrera profesional, su disciplina y deseos de superación son una inspiración para mí.

A mi comité asesor, MSc. Ney Rios, Dra. Laura Benegas y MSc. Néstor López, por sus valiosos aportes para la realización de esta tesis.

A don Carlos Orozco, por haberme permitido realizar la investigación en su finca. Muchas gracias por su apoyo en todo este proceso.

Al proyecto cosecha de agua, por haber financiado mis estudios en esta prestigiosa institución

Índice de contenido

1. Introducción	1
2. Metodología	2
2.1. Descripción del área de estudio	2
2.1.1. Ubicación	2
2.1.2. Descripción biofísica	3
2.2. Diseño metodológico	7
2.2.1. Instalación de sensores y medición de variables ambientales	7
2.2.2. Sistematización y generación de la base de datos	8
2.2.3. Descripción de propiedades físicas del suelo	9
2.2.4. Descripción de las condiciones climáticas durante el ensayo	10
2.2.5. Cálculo del balance hídrico de suelo (BHS)	10
2.2.6. Balance hídrico de suelo (BH)	13
2.2.7. Análisis estadístico de los datos	14
3. Resultados	14
3.1. Modelo conceptual de la dinámica del agua en el área de estudio	14
3.2. Propiedades físicas del suelo	15
3.2.1. Conductividad hidráulica saturada (cm s ⁻¹)	16
3.3. Condiciones climáticas durante el ensayo	16
3.4. Contenido de humedad en el suelo (m ³ m ⁻³)	17
3.5. Correlación entre la precipitación y la humedad del suelo	18
3.6. Temperatura del suelo (°C)	20
3.7. Balance hídrico del suelo	21
4. Discusión	22
4.1. Análisis de las condiciones edafoclimáticas	22
4.2. Balance hídrico de suelos	24
5. Conclusiones	26
6. Recomendaciones	26
7. Literatura citada	27
8. Anexo	31

Índice de cuadros

Cuadro 1. Propiedades químicas del suelo en la finca.....	4
Cuadro 2. Componentes del coeficiente de infiltración.....	11
Cuadro 3. Propiedades físicas del suelo en la finca.....	15

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de ubicación de la finca Carlos Orozco.....	2
Figura 2. Obra de cosecha de agua de la finca.....	3
Figura 3. Distribución mensual de la precipitación y temperatura en el área de estudio del periodo 1998-2018 (Fuente: Estación meteorológica ITCR, Cartago - INM, 2024).	3
Figura 4. Mapa de elevaciones de la finca.....	5
Figura 5. Mapa de uso de suelo del área de estudio.	6
Figura 6. (a) Sensor individual de temperatura y humedad del suelo, (b) Estación central.....	7
Figura 7. Localización de los tratamientos con respecto a la estación central.	8
Figura 8. Esquema conceptual de la sistematización y generación de la base de datos.	8
Figura 9. Instalación en campo del infiltrómetro para la medición de la conductividad hidráulica saturada (Kfs).	10
Figura 10. Modelo conceptual de la dinámica del agua en la finca.	14
Figura 11. Resultados de las pruebas conductividad hidráulica saturada (kfs) en el área con y sin influencia de la obra de cosecha de agua (entre paréntesis error estándar).	16
Figura 12. (a) Distribución temporal de las variables climáticas durante el periodo del ensayo, (b) Estadísticos descriptivos.....	17
Figura 13. Distribución de la humedad del suelo (m ³ m ⁻³) a las tres profundidades. La línea roja indica el promedio (T0: sin obra, T1: con obra a 5 m, T2: con obra a 7m, T3: con obra a 16m).	18
Figura 14. Matriz de correlación de Spearman entre la precipitación (mm) y los contenidos de humedad volumétricos (m ³ m ⁻³) en los cuatro puntos de muestreo (Significancia representada por los asteriscos). (a): T0: sin obra, (b): T1: con obra, (c): T2: con obra y (d): T3: con obra. Nota: p<0.1*, p<0.05**, p<0.01***	19
Figura 15. Distribución de la temperatura del suelo a las tres profundidades (T0: sin obra, T1: con obra, T2: con obra, T3: con obra).	20
Figura 16. Resultados del balance hídrico del suelo a las tres profundidades (T0: sin obra, T1: con obra, T2: con obra, T3: con obra).....	21
Figura 17. Pendiente de los puntos de muestreo.	23
Figura 18. Síntesis de los principales factores determinantes de las variaciones del balance hídrico de suelo en el área de los tratamientos con obra y el T0: sin obra (Fuente: Adaptado de Brooks et al., 2010).	25

Lista de acrónimos

Sigla	Significado
BHS	Balance hídrico de suelo
Ci	Coeficiente de infiltración del suelo
CC	Capacidad de campo (%)
CV	Coeficiente de variación
Da	Densidad aparente (g cm^{-3})
DEM	Modelo de Elevación Digital
Dr	Densidad real (g cm^{-3})
Esc	Escorrentía superficial
ETP	Evapotranspiración potencial
ETR	Evapotranspiración real
ETPR	Evapotranspiración potencial real
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
HD	Humedad disponible
Imn	Instituto meteorológico nacional
Kfs	Conductividad hidráulica saturada (cm s^{-1})
PMP	Punto de marchitez permanente (%)
Pi	Precipitación que infiltra al suelo
Prec	Precipitación (mm)
Pt	Porosidad total (%)
Ra	Radiación solar
Ret	Retención de lluvia interceptada por el follaje
Tmax	Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$)
Tmin	Temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$)
UTM	Universal Transverse Mercator

EFFECTO DEL ESTABLECIMIENTO DE UNA OBRA DE COSECHA DE AGUA SOBRE EL BALANCE HÍDRICO DE SUELO: ESTUDIO DE CASO EN LA PARTE MEDIA DE LA CUENCA RÍO REVENTAZÓN, COSTA RICA

Reyes, Joseling¹; Ríos, Ney; Benegas, Laura y López, Néstor

¹Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica
joseling.reyes@catie.ac.cr

Resumen:

Este estudio evalúa el impacto de una obra de cosecha de agua en el balance hídrico del suelo en una finca de la cuenca media del río Reventazón, Costa Rica. Se instaló un sistema de monitoreo con cuatro sensores que registran humedad y temperatura del suelo a tres profundidades (0-15 cm, 15-30 cm y 30-45 cm). Tres sensores se ubicaron cerca de la obra y uno en una zona no influenciada. Los resultados muestran que la obra de cosecha de agua incrementa la humedad del suelo, con niveles más altos a medida que se acerca a la estructura. Además, se observa que la pendiente del terreno juega un papel importante en la retención de agua. El balance hídrico del suelo, calculado en áreas con y sin influencia de la obra, revela picos de humedad cerca de la estructura. Estos hallazgos ofrecen información valiosa sobre la dinámica de la humedad del suelo en relación con las obras de cosecha de agua, destacando su potencial para mejorar la resiliencia climática frente a la escasez hídrica en sistemas agropecuarios.

Palabras clave: humedad del suelo, balance hídrico, conductividad hidráulica, resiliencia climática, sensores para monitoreo hídrico.

EFFECT OF ESTABLISHING A WATER HARVESTING WORK ON SOIL WATER BALANCE: CASE STUDY IN THE MIDDLE PART OF THE RÍO REVENTAZÓN BASIN, COSTA RICA

Reyes, Joseling¹; Ríos, Ney; Benegas, Laura y López, Néstor

Abstract:

This study evaluates the impact of a water harvesting structure on the soil water balance in a farm located in the middle Reventazón River basin, Costa Rica. A monitoring system was installed with four sensors that record soil moisture and temperature at three depths (0-15 cm, 15-30 cm, and 30-45 cm). Three sensors were placed near the structure and one in an unaffected area. The results show that the water harvesting structure increases soil moisture, with higher levels closer to the structure. Additionally, the slope of the land plays an important role in water retention. The soil water balance, calculated in areas with and without influence from the structure, reveals moisture peaks near the structure. These findings provide valuable information on the dynamics of soil moisture in relation to water harvesting structures, highlighting their potential to enhance climate resilience in the face of water scarcity in agricultural systems.

Keywords: soil moisture, water balance, hydraulic conductivity, climate resilience, sensors for water monitoring.

1. Introducción

La escasez de agua, referida a la falta de recursos de agua dulce para satisfacer la demanda hídrica, ya sea para consumo, actividades productivas, uso doméstico o industrial, impone limitaciones significativas a la integridad social y el desarrollo económico para más de 2,000 millones de personas en todo el mundo (Tzanakakis *et al.*, 2020). Se espera que esta cifra se incremente durante los próximos años, impulsada por el crecimiento poblacional, cambios en los patrones de precipitación, las exigencias en los niveles de vida, ocasionadas por el cambio climático, y las intervenciones locales como la deforestación extensiva.

Con los efectos del cambio climático, la gestión y el uso de los recursos hídricos adquieren cada vez mayor importancia, tanto a nivel agrícola como residencial. En este sentido, una de las regiones más vulnerable a esta problemática es Centroamérica, donde las sequías y las inundaciones debido a fenómenos hidrometeorológicos extremos son cada vez más severas y frecuentes. Este panorama afecta la disponibilidad de los recursos hídricos locales y podría extenderse a diversos sectores socioeconómicos, en especial en zonas rurales cuyos medios de vida dependen fundamentalmente de actividades agropecuarias (Loria *et al.*, 2020; FAO, 2013).

En este marco, los sistemas de cosecha de agua se perfilan como una alternativa para contribuir significativamente a satisfacer esa demanda creciente de agua, mantener la calidad de los recursos hídricos locales y mejorar la eficiencia del agua disponible (Yannopoulos *et al.*, 2019; Yosef & Asmamaw, 2015). En los últimos años, ha habido un creciente interés por este tipo de sistemas, promovido por la flexibilidad que exhiben para adaptarse a diversas condiciones locales, técnicas de recolección, simplicidad y, sobre todo, por la rentabilidad y los beneficios potenciales que generan en la economía de las familias, los recursos hídricos, el suelo y el ambiente (Tzanakakis *et al.*, 2020; Elgert *et al.*, 2016).

En la literatura, se encuentran ampliamente documentados los beneficios de las obras de cosecha de agua en la economía de las familias rurales (Reddy *et al.*, 2012; Zabidi *et al.*, 2020), los recursos hídricos y el ambiente (Calianno *et al.*, 2020; Imroatul C. *et al.*, 2017), en particular por las obras de cosecha de agua permeables, ya que además de proveer un suministro de agua tanto para actividades productivas como domésticas, también aportan beneficios significativos al suelo, especialmente para la restauración de la humedad edáfica y la recarga de cuerpos de aguas subterráneos (Al-Seekh & Mohammad, 2009; Matus, 2023).

No obstante, aún se requieren más avances en la investigación para cuantificar el alcance de estos beneficios en el sistema agua-suelo-planta. En este sentido, un enfoque adecuado para analizar de manera integral la interacción entre estos tres componentes es el balance hídrico de suelo, que ofrece un marco conceptual clave para analizar la variabilidad espacial y temporal del agua en una unidad de tierra. Al considerar la precipitación, evapotranspiración, escorrentía y drenaje, este enfoque permite identificar cómo las fluctuaciones en el suministro de agua (precipitación o riego) afectan las salidas del sistema, determinadas por la evaporación y la transpiración de las plantas, y moduladas por la capacidad de almacenamiento del suelo (Ritchie, 1998; Milly, 1994).

El presente estudio se plantea como objetivo, evaluar el efecto del establecimiento de una obra de cosecha de agua sobre el balance hídrico de suelo, con el propósito de mejorar la comprensión sobre las interacciones entre el clima, el suelo y las plantas. Con este fin, se instalaron sensores que miden variables de suelo y clima establecidos en un área bajo influencia de la obra y otro en un sitio sin influencia, con el objetivo de comparar y cuantificar la magnitud del efecto del reservorio sobre el balance hídrico.

2. Metodología

2.1. Descripción del área de estudio

2.1.1. Ubicación

El ensayo se encuentra ubicado en un área denominada finca Carlos Orozco, localizada en el cantón de Paraíso, provincia de Cartago, Costa Rica (UTM 186522 1090287 Zona 17N), a una altura promedio de 1371 msnm. Esta finca cuenta con un área de 6000 m², utilizada para cultivos anuales (Figura 1).

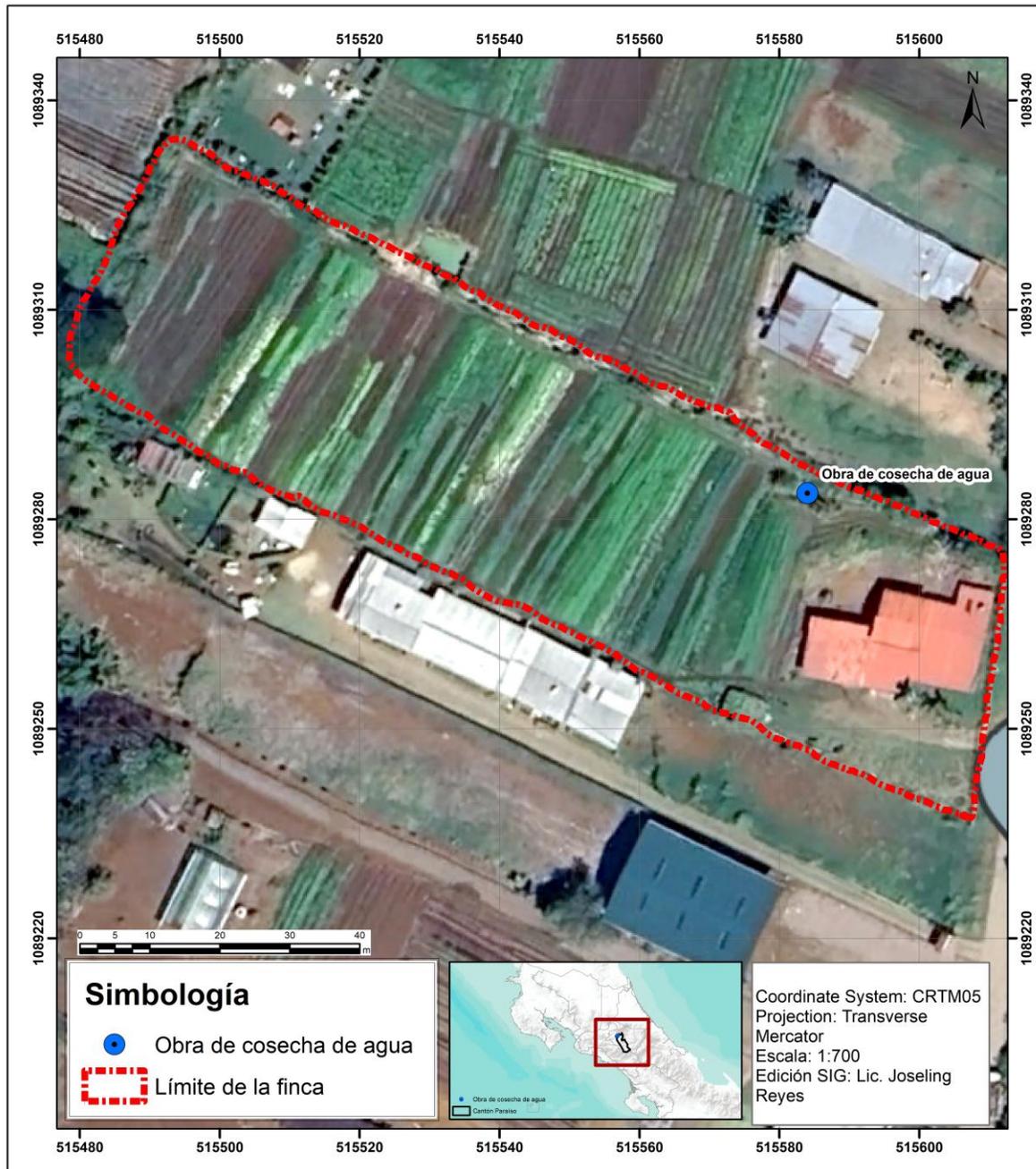


Figura 1. Mapa de ubicación de la finca Carlos Orozco.

La finca cuenta con una obra de cosecha de agua de forma rectangular que posee las siguientes dimensiones: 4 m de ancho por 8 m de largo y una profundidad de 7 m, la cual permite un volumen de almacenamiento aproximado de 224 m³, con taludes de tierra y piso no impermeabilizados, y es utilizada para el riego de los cultivos (Figura 2).

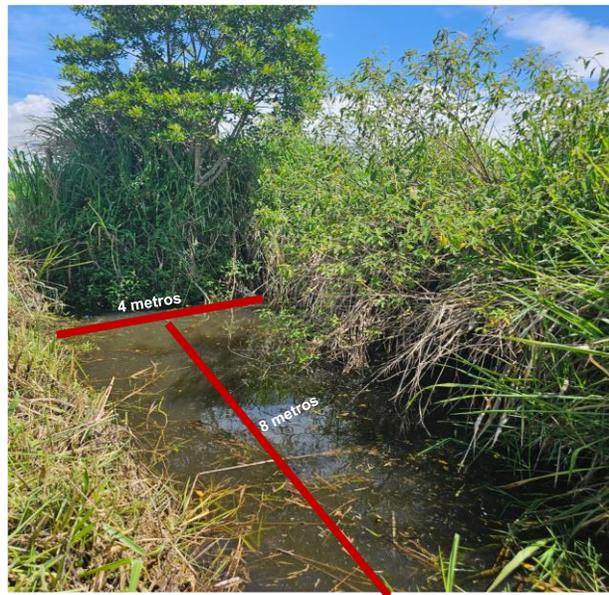


Figura 2. Obra de cosecha de agua de la finca

2.1.2. Descripción biofísica

2.1.2.1. Clima

La zona donde se ubica el área de estudio presenta un acumulado anual de precipitación de 1465 mm, distribuidos en una estación seca que va de enero a abril, con un acumulado de 155.3 mm y una estación húmeda que presenta un patrón bimodal que abarca los meses de mayo a diciembre y presenta un acumulado de 1310 mm. El mes de octubre corresponde al mes más húmedo del año, con un acumulado de 230 mm mes⁻¹. En cambio, marzo corresponde al mes más seco, con un acumulado de 21 mm (Figura 3).

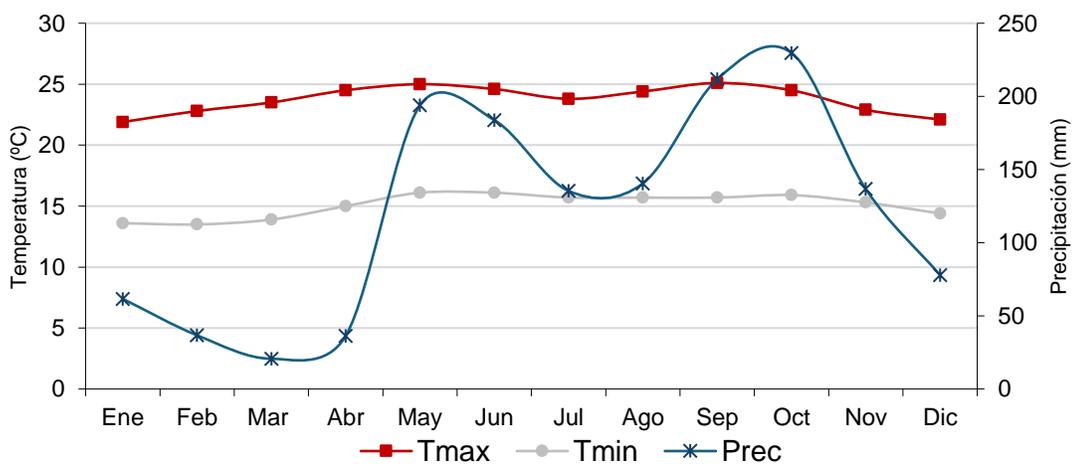


Figura 3. Distribución mensual de la precipitación y temperatura en el área de estudio del periodo 1998-2018 (Fuente: Estación meteorológica ITCR, Cartago - INM, 2024)¹.

¹ Enlace: <https://www.imn.ac.cr/9012082f-2b1d-46bc-bbf0-c07bf9c1fd45>

Por su parte, las temperaturas máximas y mínimas presentan un patrón constante a lo largo del año, con valores que alcanzan promedios de 23.8 °C y 15.1 °C, respectivamente. Los meses más cálidos del año corresponden a los meses de abril, mayo, junio y septiembre, que presentan temperaturas por encima de los 25°C. La amplitud térmica media es de 8.7°C; no obstante, durante los meses de febrero, marzo, abril y septiembre, la amplitud térmica supera los 9°C.

2.1.2.2. Suelo

La zona de la cuenca donde se realizó el estudio presenta suelos del orden ultisol. Según Elizondo (2016), estos se caracterizan por sus altos grados de meteorización, profundos, texturas finas, buena estructura y por un horizonte argílico con alta saturación de arcilla y bajos contenidos de bases, como resultado de la alta lixiviación, lo que resulta en suelos ácidos. Su desarrollo se vincula a condiciones climáticas húmedas y a una topografía que varía desde suavemente ondulada hasta fuertemente ondulada. La coloración de estos suelos va desde tonalidades pardo-rojizas hasta amarillentas y se debe principalmente a la lixiviación del hierro.

Los suelos de la finca presentan condiciones muy similares, ya que pertenecen a este mismo orden. En el cuadro 1, se muestran resultados de las propiedades químicas del suelo, las cuales fueron determinadas a través de un muestreo sistemático, del cual se colectaron 25 submuestras a una profundidad de 30 cm para preparar una muestra compuesta utilizada con el fin de realizar los análisis correspondientes.

En términos generales, los suelos presentan un pH ligeramente ácido, una baja acidez intercambiable y conductividad eléctrica. Estos suelos se caracterizan por una buena fertilidad debido a altos contenidos de Nitrógeno, Potasio, Hierro, Cobre, Zinc, Manganeseo y materia orgánica de rápida descomposición, la cual se asocia a los rastrojos de cultivo incorporados al suelo. Sin embargo, presenta contenidos medios de Fósforo y Magnesio, este último se asocia a una CIC media y una saturación de bases baja.

Cuadro 1. Propiedades químicas del suelo en la finca.

Parámetros	Unidad de medida	Resultado	Interpretación	Método utilizado
pH	-	6.2	Ligeramente ácido	H ₂ O 1:2.5
Acidez intercambiable (Al ³⁺ + H ⁺)	cmol(+)/kg	0.12	Baja	KCl 1 N, 1:2.5
Conductividad eléctrica	mS/cm	0.5	Baja	Conductivímetro
N total	%	0.26	Alto	Autoanalizador por combustión seca.
P	mg/L	11	Medio	KCl-Olsen Modificado
K ⁺	cmol(+)/kg	1.60	Alto	NH ₄ OAc, 1 M, pH 7.0
Ca ²⁺	cmol(+)/kg	10.65	Medio	NH ₄ OAc, 1 M, pH 7.0
Mg ²⁺	cmol(+)/kg	2.81	Bajo	NH ₄ OAc, 1 M, pH 7.0
Fe ²⁺	mg/L	79	Alto	KCl-Olsen Modificado
Cu ²⁺	mg/L	29	Alto	KCl-Olsen Modificado
Zn ²⁺	mg/L	5.3	Alto	KCl-Olsen Modificado
Mn ²⁺	mg/L	41	Alto	KCl-Olsen Modificado
C total	%	2.56	Alto	Autoanalizador por combustión seca.
Materia orgánica	%	4.40	Alto	Combustión seca Dumas
Relación C:N	-	9.8	Baja	-

Parámetros	Unidad de medida	Resultado	Interpretación	Método utilizado
CIC	cmol(+)/kg	31.03	Media	NH ₄ OAc, 1 M, pH 7.0
Bases (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺ , Na ⁺)	%	46.31	Baja	NH ₄ OAc, 1 M, pH 7.0

Los datos corresponden a los análisis realizados en el laboratorio de suelo de la UCR.

2.1.2.3. Relieve y topografía

Para la descripción de las elevaciones circundantes al área de estudio, se empleó un modelo de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés) con una resolución de 12.5 m descargado de la plataforma Alos Palsar (Japan Aerospace Exploration Agency, 2014). Posteriormente se realizó el llenado de sumideros (Fill) en el *software* ArcGIS y se calcularon las elevaciones correspondientes al sitio de trabajo. El área de estudio presenta una altitud promedio de 1371 metros sobre el nivel del mar (msnm), que varía entre 1384 msnm y 1358 msnm. Por su parte, la pendiente oscila entre 0-11%, lo que indica que el relieve es moderadamente ondulado.

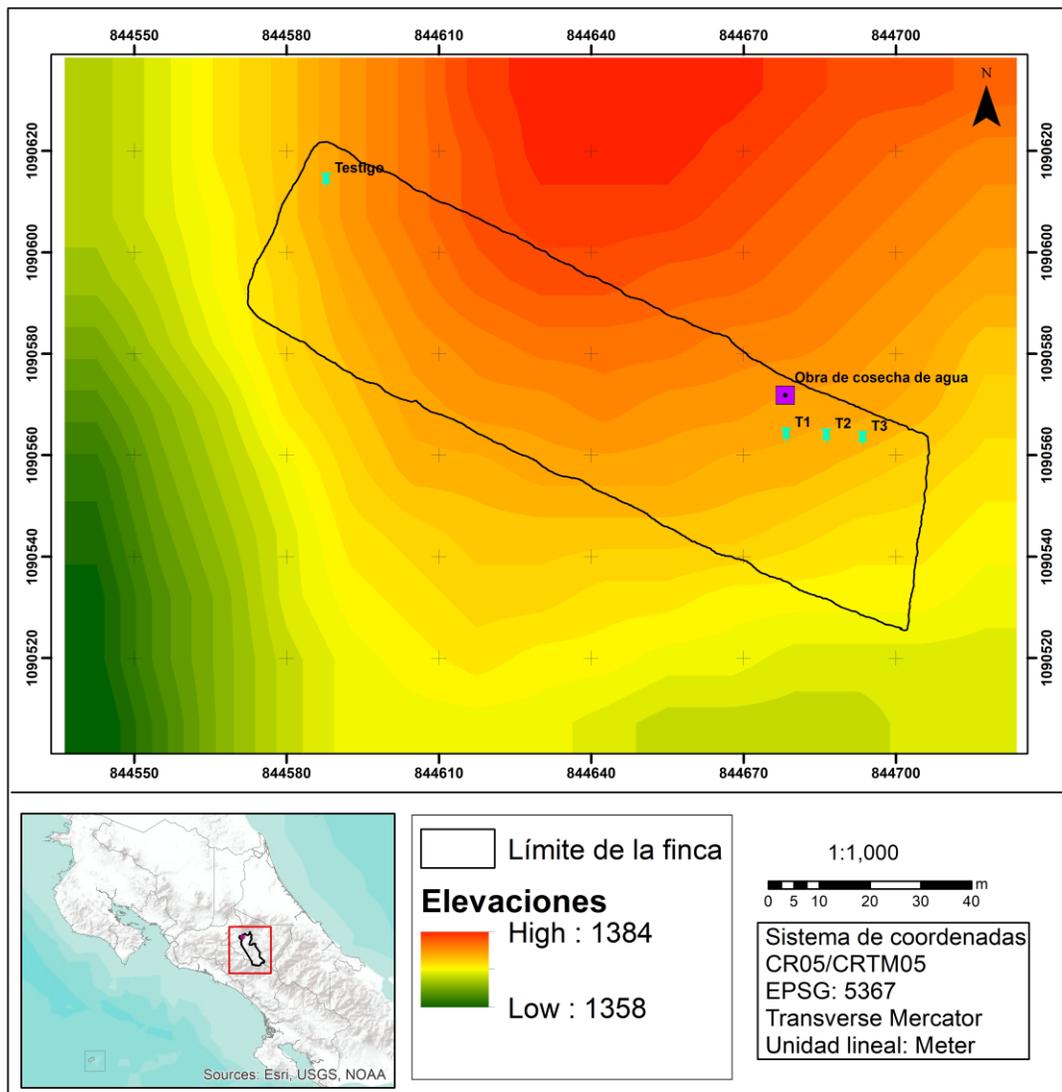


Figura 4. Mapa de elevaciones de la finca

2.1.2.4. Uso y manejo del suelo

El uso de suelo predominante en el área de estudio es agrícola, con enfoque en la producción de hortalizas de ciclo corto durante todo el año que se siembran bajo un sistema rotacional definido por el ciclo de cada especie, el cual varía entre 2 a 6 meses para la mayoría de los cultivos. Las principales especies cultivadas en la finca son: hierbabuena (*Menta spicata* L), albahaca (*Ocimum basilicum* L), kale (*Brassica oleracea* L), culantro (*Eryngium foetidum* L), lechuga (*Lactuca sativa* L), remolacha (*Beta vulgaris* L), mostaza china (*Brassica juncea* L), cebollín (*Allium schoenoprasum* L), tomillo (*Thymus vulgaris* L), apio (*Apium graveolens* L), perejil (*Petroselinum crispum*) y orégano (*Origanum vulgare* L).

En cuanto al manejo, en la finca se emplea una combinación de prácticas convencionales y agroecológicas, como la rotación y asocio de cultivos, el uso de fertilizantes sintéticos y orgánicos y la aplicación de bioinsumos y pesticidas para el control de plagas y enfermedades. Pese a la pendiente del terreno, son frecuentes las actividades de labranza primaria y secundaria con vistas a mejorar las condiciones físicas del suelo para el desarrollo de los cultivos. Además, se realizan aplicaciones de enmiendas calcáreas con el propósito de corregir la acidez de suelo, el cual se considera un problema inherente en este tipo de suelos.



Figura 5. Mapa de uso de suelo del área de estudio.

2.2. Diseño metodológico

2.2.1. Instalación de sensores y medición de variables ambientales

Esta investigación parte de la hipótesis de que el establecimiento de una obra de cosecha de agua permeable tiene una influencia sobre el balance hídrico y la temperatura del suelo. En este marco, para evaluar ese efecto potencial, se estableció un ensayo de campo durante el periodo comprendido entre el 24/06/2024 al 09/09/2024, utilizando un sistema compuesto por cuatro sensores inalámbricos, que fueron ubicados a diferentes distancias con respecto a la obra de cosecha de agua, denominados T1 con obra a 5 metros de distancia, T2 con obra a 7 metros, T3 con obra a 16 metros y T0 sin obra ubicado a 103 metros, que registran datos de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y humedad volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) del suelo a tres profundidades: 0-15 cm, 15-30 cm y 30-45 cm, los cuales están sincronizados a una estación central². (Figura 6).

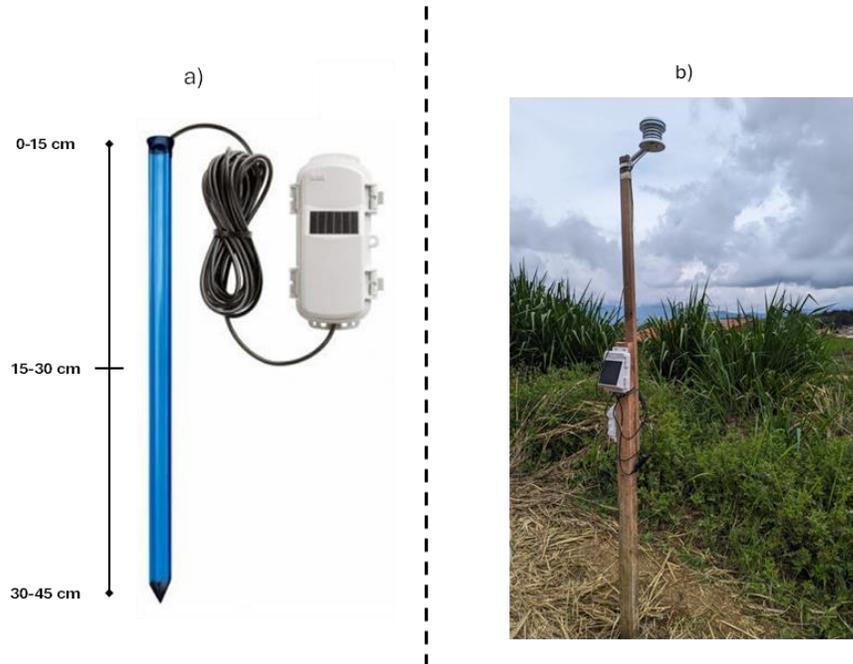


Figura 6. (a) Sensor individual de temperatura y humedad del suelo, (b) Estación central.

Para la instalación de los cuatro sensores, se consideraron características del terreno relacionados a la accesibilidad dentro de la finca, elevación (± 2 msnm) y pendiente del terreno con respecto a la obra de cosecha de agua (<0.15 m/m). Además, se estableció un radio de al menos 8 m alrededor de cada tratamiento para evitar la influencia del sistema de riego que se utiliza en la finca. Todos los sensores fueron ubicados a una distancia medida con respecto a la obra de cosecha de agua para establecer una relación directa con el punto de interés a diferentes distancias.

En el caso de T0 sin obra, se seleccionó un sitio con una pendiente similar a la del T1 con obra y una distancia mayor de 100 m a la obra de cosecha de agua, con el objetivo de comparar los resultados bajo las mismas condiciones ambientales, excluyendo el efecto de la obra sobre el suelo circundante al sensor. En la Figura 7, se muestran las distancias en las que fueron localizados los tratamientos, incluidas las elevaciones y pendientes con respecto a la obra de cosecha de agua.

² Tanto los sensores como la estación central están alimentados por energía solar.

Todos los sensores de medición fueron calibrados previo al inicio del ensayo. La calibración de cada uno de los equipos fue realizada por la empresa Termo Trace.

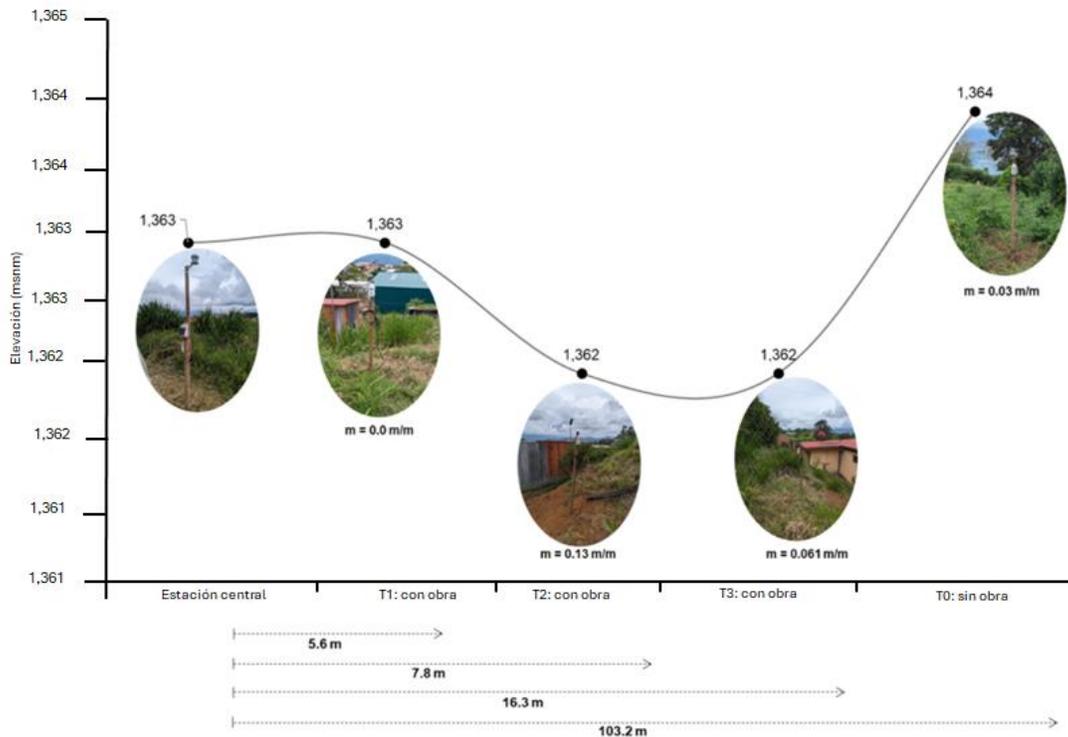


Figura 7. Localización de los tratamientos con respecto a la estación central.

2.2.2. Sistematización y generación de la base de datos

Los datos se registran cada 30 minutos y se almacenan en la estación central, la cual se conecta cada 6 horas a la plataforma web Hobolink donde los almacena automáticamente en un archivo .xlsx. La primera columna corresponde a la fecha y hora de cada dato registrado y las columnas siguientes, al conjunto de variables analizadas. En la Figura 8 se muestra el esquema conceptual de la sistematización y generación de la base de datos.

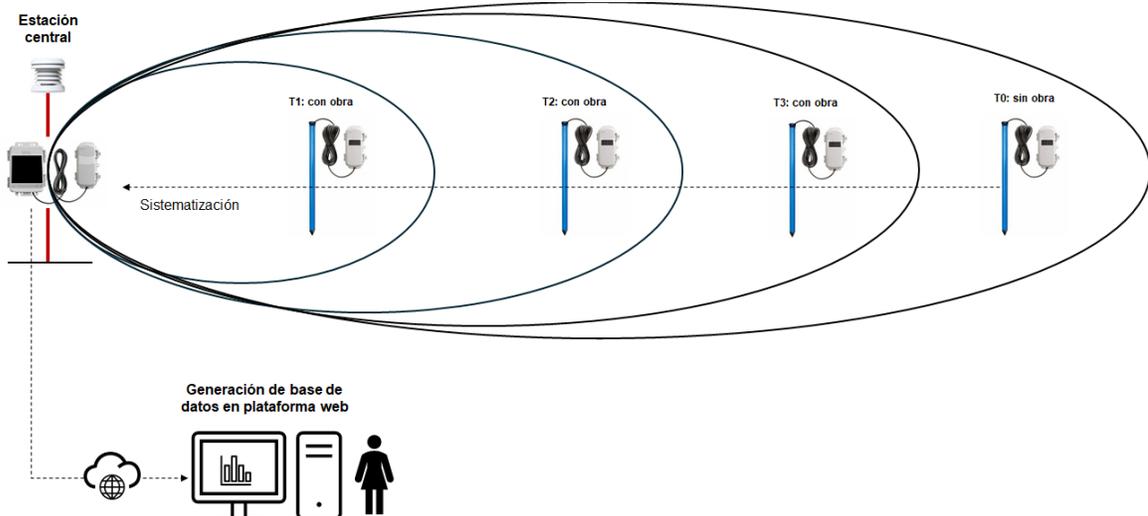


Figura 8. Esquema conceptual de la sistematización y generación de la base de datos.

Se estableció un intervalo de descarga de los datos cada 24 horas para facilitar la sistematización, el monitoreo del estado de los sensores y el control de calidad de los datos generados. La base de datos que se procesó se conformó en un archivo .xlsx.

2.2.3. Descripción de propiedades físicas del suelo

Se realizó una caracterización de siete propiedades físicas del suelo a las tres profundidades evaluadas (0-15 cm, 15-30 cm, 30-45cm) considerando que estos parámetros influyen en los contenidos de humedad y temperatura en cada capa del suelo analizada, lo cual permitió interpretar correctamente los datos recolectados por los sensores. Las propiedades analizadas fueron las siguientes:

- **Densidad aparente (g cm^{-3}):** Con el uso de un cilindro metálico de volumen 98.2 cm^3 , se colectaron seis muestras de suelo a cada profundidad, las cuales fueron pesadas en campo para registrar su peso húmedo. Luego, todas las muestras se secaron en un horno durante 24 horas a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ y se aplicó la ecuación 1. El valor reportado en la sección de resultados corresponde al promedio de las seis muestras para cada profundidad.

$$D_a (\text{g cm}^3) = \frac{\text{Peso seco (g)}}{\text{Volumen del cilindro (cm}^3\text{)}} \quad \text{Ecuación 1}$$

- **Textura:** Se determinó la proporción de arena, limo y arcilla a partir de una muestra compuesta por cada submuestra recolectada para la medición de la densidad aparente a las tres profundidades utilizando el método de Bouyuco descrito en Soil Survey Staff (2014).
- **Estructura:** Se determinó de manera visual utilizando la guía para la descripción de suelos (FAO, 2012).
- **Porosidad total (%):** La porosidad total se calculó como $P_t (\%) = 1 - (D_a/D_r)$, utilizando como dato de referencia un valor de densidad real (D_r) de 2.65 g cm^{-3} , el cual se considera un valor promedio para suelos minerales (Gimenez, 2020).
- **Capacidad de campo (%) y Punto de Marchitez Permanente (%):** Ambos parámetros fueron estimados utilizando la aplicación SPAW - Versión 6.02 (USDA, 2016), que utiliza los siguientes datos de entrada para la estimación: porcentaje de arena, limo y arcilla, contenido de materia orgánica (%) y conductividad eléctrica (dS/m).
- **Contenido de agua disponible en el suelo (%):** Se calculó como la diferencia entre el porcentaje de humedad a CC y PMP.
- **Color Munsell:** Se determinó en seco utilizando la tabla de colores Munsell.

Adicionalmente a este conjunto de parámetros, se efectuaron dos pruebas para medir la conductividad hidráulica saturada de campo (Kfs). La primera se realizó en la zona de influencia directa de la obra de cosecha de agua y la otra, cerca del área sin influencia de la obra. Las pruebas se desarrollaron con un infiltrómetro automatizado SATURO®, utilizando un anillo de inserción de 5 cm de diámetros por 14 cm de alto, el cual se inserta al ras del suelo. Cada prueba tuvo una duración de 75 minutos, de los cuales 15 minutos corresponden al humedecimiento del área, indicado para suelos de textura franco-arenosa en condiciones húmedas (Figura 9).



Figura 9. Instalación en campo del infiltrómetro para la medición de la conductividad hidráulica saturada (Kfs).

2.2.4. Descripción de las condiciones climáticas durante el ensayo

Las condiciones climáticas durante el ensayo están definidas por el comportamiento diario de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), precipitación (mm) y evapotranspiración potencial (mm). En el caso de la temperatura, se utilizó un sensor acoplado a la estación central que mide la temperatura instantánea del aire en intervalos de 30 minutos, los cuales se registran y almacenan siguiendo el mismo algoritmo de los datos de suelo.

En cuanto a la precipitación, se instalaron tres pluviómetros tipo cuña graduados de 0.1 a 150 mm, que se midieron diariamente a una hora determinada. Por último, la evapotranspiración potencial se calculó con base en el método propuesto por Hargreaves (1994) a partir de datos de temperatura máxima, mínima y promedio derivados de las mediciones del sensor acoplado a la estación central, y de datos de radiación solar descargados de la estación meteorológica ITCR, proporcionados por el IMN a nivel mensual, los cuales fueron ajustados a valores diarios para el periodo del ensayo. Se utilizó la siguiente ecuación para el cálculo:

$$ETP \text{ (mm día}^{-1}\text{)} = 0.0023 * R_a * (t_{max} - t_{min})^{0.5} * (t_{avg} + 17.8) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde ETP (mm día^{-1}) corresponde a la evapotranspiración potencial diaria en mm, R_a a la radiación solar en $\text{Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, t_{max} , t_{min} y t_{avg} a la temperatura máxima, mínima y promedio diaria respectivamente expresada en $^{\circ}\text{C}$.

2.2.5. Cálculo del balance hídrico de suelo (BHS)

Con la información disponible, se procedió a realizar una primera aproximación del balance hídrico a nivel del suelo. Para ello se calculó el balance hídrico de suelos a cada profundidad utilizando el método de Schosinsky (2006). Este cálculo se realizó a nivel diario con base a datos de conductividad hidráulica (cm s^{-1}), precipitación diaria (mm día^{-1}), humedad del suelo

($m^3 m^{-3}$) y evapotranspiración potencial ($mm día^{-1}$) recolectados durante el periodo del ensayo. A partir de estos datos, se calculan los siguientes componentes del balance:

2.2.5.1. Parámetros considerados para el cálculo del balance hídrico según la metodología de Schosinsky

2.2.5.2. Retención de lluvia interceptada por el follaje (Ret)

Para calcular la retención de lluvia que se infiltra por el follaje, se consideran los siguientes criterios:

Si P es menor o igual a $0.17 mm día^{-1}$, $Ret = P$

Si el producto (P) (Cfo) es mayor o igual de $0.17 mm día^{-1}$, $Ret = (P) (Cfo)$

Si P es mayor de $0.17 mm día^{-1}$ y el producto (P) (Cfo) menor de 0.17, $Ret = 0.17$

Donde:

P= precipitación diaria ($mm día^{-1}$)

Ret= Retención de lluvia en el follaje ($mm día^{-1}$)

Cfo= Coeficiente de retención del follaje, para bosques muy densos Cfo= 0.20, otros Cfo= 0.12 (adimensional)

Dadas las condiciones de la presente área de estudio, el valor de Cfo más adecuado fue 0.12

2.2.5.3. Coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo (Kfc)

Si fc se encuentra entre 16 y 1568 $mm día^{-1}$ se utiliza la siguiente ecuación:

$$Kfc = 0.26 \ln(fc) - 0.000154fc - 0.723 \quad \text{Ecuación 3}$$

Si fc es menor a $16 mm día^{-1}$: $Kfc = 0.0148fc/16$

Si fc es mayor de $1568 mm día^{-1}$: $Kfc = 1$

2.2.5.4. Coeficiente de infiltración del suelo (Ci)

El coeficiente de infiltración (Ci) se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$Ci = Kp + Kv + Kfc \quad \text{Ecuación 4}$$

Si $Kp + Kv + Kfc$ es mayor de 1, $Ci = 1$

Si $Kp + Kv + Kfc$ es menor o igual a 1, entonces $Ci = Kp + Kv + Kfc$

Donde:

Ci= Coeficiente de infiltración [adimensional]

Kp= Fracción que infiltra por efecto de pendiente [adimensional]

Kv= Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal [adimensional]

Kfc= Fracción que infiltra por textura del suelo [adimensional]

Cuadro 2. Componentes del coeficiente de infiltración.

Por pendiente	Pendiente	Kp
Muy plana	0.02% - 0.06%	0.30
Plana	0.3% - 0.4%	0.20
Algo plana	1% - 2%	0.15
Promedio	2% /- 7%	0.10
Fuerte	> 7%	0.06
Por cobertura vegetal		Kv
Cobertura con zacate < del 50%		0.09
Terrenos cultivados		0.10

Por pendiente	Pendiente	Kp
Cobertura con pastizal		0.18
Bosques		0.20
Cobertura con zacate más del 75%		0.21

Fuente: Schosinsky & Losilla (2000)

Dadas las condiciones presentes en la finca, los valores usados para Kp fueron 0.06 y 0.10 para la fracción que infiltra por efecto de la cobertura (Kv).

2.2.5.5. Precipitación que infiltra al suelo (Pi)

$$P_i = (C_i)(P - Ret) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

Pi= Precipitación que infiltra al suelo en (mm día⁻¹)

Ci= Coeficiente de infiltración [adimensional]

P= Precipitación mensual en (mm día⁻¹)

Ret= Retención de lluvia mensual por follaje en (mm día⁻¹)

El coeficiente de infiltración nunca debe ser mayor a 1, en caso de ser así, se le asigna un valor de 1.

2.2.5.6. Escorrentía superficial (Esc)

$$ESC = P - Ret - P_i \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

ESC= Escorrentía superficial en (mm día⁻¹)

P= Precipitación en (mm día⁻¹)

Ret= Retención de lluvia por follaje en (mm día⁻¹)

Pi= Precipitación que infiltra al suelo en (mm día⁻¹)

Adicionalmente a estos cálculos, se necesitan los datos de capacidad de campo y punto de marchitez. Para este estudio, se obtuvieron a través de la proporción granulométrica utilizando la aplicación SPAW. También es fundamental conocer la profundidad aproximada de las raíces, que en este estudio fueron 0-15 cm, 15-30 cm y 30-45 cm.

2.2.5.7. Coeficiente de humedad antes de que ocurra la evapotranspiración (C1)

$$C_1 = \frac{(H_{Si} - PM + P_i)}{(CC - PMP)} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

C1= Coeficiente de humedad antes de que ocurra la evapotranspiración

Hsi= Humedad inicial (mm)

PMP= Punto de marchitez (mm)

Pi= Precipitación que infiltra en (mm día⁻¹)

CC= Capacidad de campo en (mm)

2.2.5.8. Coeficiente de humedad después de que ocurra la evapotranspiración (C2)

$$C_2 = \frac{H_{Si} - PM + P_i - ETR_1}{(CC - PM)} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$ETR_1 = (C_1)(ETP) \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

C2= Coeficiente de humedad después de que ocurra la evapotranspiración

ETR1= Evapotranspiración potencial real (mm día⁻¹)

ETP= Evapotranspiración potencial (mm día⁻¹)

2.2.5.9. Evapotranspiración potencial real (ETPR)

$$ETPR = \left(\frac{(C1 + C2)}{2} \right) ETP \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

ETPR= Evapotranspiración real tentativa, en una zona (mm día⁻¹)

C1= Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la evapotranspiración

C2= Coeficiente de humedad mínimo, considerando la evapotranspiración calculada con C1

ETP= Evapotranspiración potencial (mm día⁻¹)

Los valores de C1 y C2, no pueden ser mayor a 1, ni menores a 0. Si C1 es mayor a 1, se tomará igual a 1. Si C1 o C2 son negativos tomarán el valor de 0.

2.2.5.10. Humedad disponible (HD)

$$HD = HSi + Pi - PM \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

HD= Humedad disponible (mm día⁻¹)

Hsi= Humedad de suelo inicial (mm)

Pi= Precipitación que infiltra (mm)

PM= Punto de marchitez (mm)

2.2.5.11. Evapotranspiración real (ETR)

Si $((C1 + C2) / 2) ETP$ es menor o igual a la humedad disponible (HD), se utiliza la siguiente ecuación:

$$ETR = \left(\frac{C1+C2}{2} \right) ETP \quad \text{Ecuación 12}$$

En cambio, si $((C1 + C2) / 2) ETP$ es mayor que HD se utiliza la siguiente ecuación:

$$ETR = HD \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

ETR= Evapotranspiración real (mm día⁻¹)

C1= Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la evapotranspiración [adimensional]

C2= Coeficiente de humedad mínimo considerando la evapotranspiración calculada con C1 [adimensional]

ETP= Evapotranspiración potencial (mm día⁻¹)

HD= Humedad disponible (mm día⁻¹)

2.2.6. Balance hídrico de suelo (BH)

Finalmente, para calcular el balance hídrico del suelo se utilizan los siguientes criterios: Si $(HD + PMP - ETR)$ es menor que la CC, entonces $BH = HD + PM - ETR$. En cambio, si $(HD + PM - ETR)$ es mayor o igual que la CC, entonces $BH = CC$. Según esta metodología, BH en ningún momento puede ser mayor a la CC.

2.2.7. Análisis estadístico de los datos

El análisis de los datos considera el uso de estadísticos descriptivos como la media aritmética, coeficiente de variación, máximos y mínimos para analizar el comportamiento de los datos. Además, se definieron series de tiempo para evaluar la distribución temporal de las variables analizadas. Adicionalmente, se determinaron matrices de correlación múltiple de Spearman para identificar posibles asociaciones entre las variables de precipitación y contenidos de humedad volumétrica del suelo a las tres profundidades. Se evaluó la significancia de los coeficientes con un 95 % de confianza ($\alpha = 0.05$). Para la configuración de la base de datos, estructura, procesamiento y generación de los resultados se usó el *software* InfoStat y RStudio a través de las librerías ggplot2, dplyr, GGally, Hmisc, Corplot y PerformanceAnalytics.

3. Resultados

3.1. Modelo conceptual de la dinámica del agua en el área de estudio

En la Figura 10, se presenta un esquema que representa la dinámica del agua en la finca. En primer lugar, se destaca que la obra de cosecha de agua se ubica en una posición alta de la pendiente dentro de los límites de la finca. Las principales entradas de agua identificadas corresponden a la precipitación e infiltración y, en menor medida, a la condensación del vapor de agua del aire a nivel del suelo. En cambio, las pérdidas están relacionadas a los procesos de evaporación, transpiración de los cultivos y por la escorrentía superficial debido al efecto de la pendiente.

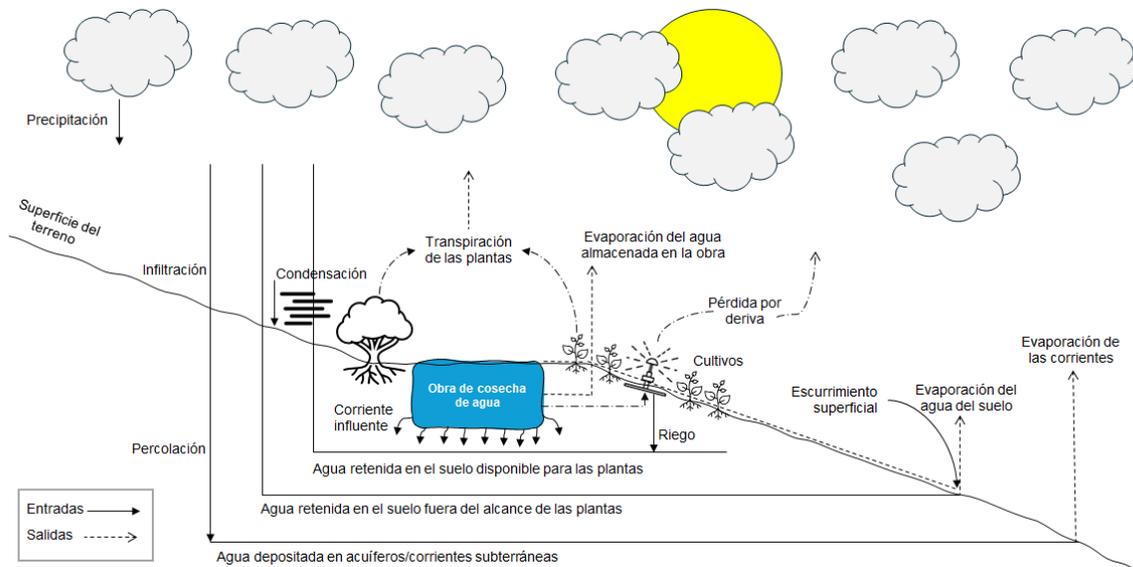


Figura 10. Modelo conceptual de la dinámica del agua en la finca.

Dado que la obra alimenta un sistema de riego por aspersión utilizado para los cultivos, también se identifica una entrada y salida de agua al suelo vía del sistema de riego instalado en la finca. La entrada se asocia al riego en sí y la pérdida debido al viento. Además, al tomar en cuenta que la obra no se encuentra sellada en el vaso por capas sintéticas como plásticos o geomembranas, y que el nivel freático es profundo debido al alto grado de desarrollo de este tipo de suelos, se considera una pérdida del volumen de agua almacenado en la obra por percolación profunda que produce un aporte a las aguas subterráneas. Esta agua que permea a través del reservorio permite la recarga de acuíferos o corrientes subterráneas y se le conoce como corriente influente.

3.2. Propiedades físicas del suelo

El Cuadro 2 presenta las propiedades físicas del suelo evaluadas a las tres profundidades (0-15 cm, 15-30 cm y 30-45 cm) en toda la finca. La textura del suelo en todas las capas analizadas se clasifica como franca, con una mayor predominancia de arena en los primeros 15 cm y de arcilla y arena en las demás profundidades.

Con respecto a la estructura, en las tres profundidades predomina una estructura granular, que presenta muchos poros y es muy friable al tacto. No obstante, en la capa más profunda, se observa una mayor presencia de agregados con forma de bloques en combinación con los gránulos. Por su parte, la densidad aparente (D_a) del suelo se mantiene constante en las dos primeras capas, con un valor bajo de 0.84 g/cm^3 , que incrementa ligeramente a 0.89 g/cm^3 en la profundidad de 30-45 cm. La porosidad total (Pt) también presenta una ligera disminución con la profundidad, que pasa de 68.3 % en las dos primeras capas a 66.3 % en la más profunda.

Cuadro 3. Propiedades físicas del suelo en la finca.

Propiedades físicas	Profundidades (cm)		
	0-15	15-30	30-45
Textura	Franco arenoso	Franco arcillo arenoso	Franco arcillo arenoso
Estructura	Granular	Granular	Granular compuesta
D_a (g cm^{-3})	0.84	0.84	0.89
Porosidad total (%)	68.3	68.3	63.3
CC (%)	25.1	26.4	28.6
PMP (%)	14.1	15.1	17.2
Contenido de agua disponible en el suelo (%)	11	11.3	11.4
Color Munsell	7.5YR4/3 (Brown)	5YR4/3 (Reddish brown)	7.5YR4/3 (Brown)

D_a = Densidad aparente; CC= Capacidad de campo; PMP= Punto de marchitez permanente.

En cuanto a la capacidad de campo (CC), que representa la cantidad de agua que el suelo puede retener después del drenaje gravitacional (Zotarelli *et al.*, 2013), se observa un incremento progresivo con la profundidad, desde 25.1 % en la capa superficial hasta 28.6 % en la capa más profunda. De manera similar, el punto de marchitez permanente (PMP), el cual indica la cantidad de agua retenida en el suelo que no está disponible para las plantas (Zotarelli *et al.*, 2013), también aumenta con la profundidad, y pasa de 14.1 % en la capa superficial a 17.2 % en la capa de 30-45 cm. La diferencia entre ambos parámetros, la cual indica el porcentaje de humedad disponible, varía ligeramente entre 11 % y 11.4 % a lo largo del perfil y es un poco mayor en la capa más profunda. Finalmente, el color del suelo, determinado mediante la carta de Munsell en seco, se reporta como 7.5YR4/3 (Brown) en las capas de 0-15 cm y 5YR4/3 (Reddish brown) en la capa de 30-45 cm.

3.2.1. Conductividad hidráulica saturada (cm s^{-1})

En la Figura 11, se observan los resultados obtenidos de las pruebas de conductividad hidráulica realizadas de manera diferenciada, tanto en la zona de influencia de la obra de cosecha de agua como en el área testigo. Los resultados indican una conductividad hidráulica considerablemente menor en el área cercana a la obra con una velocidad de 0.001 cm s^{-1} . En cambio, en el área sin influencia de la obra se observa una mayor conductividad que alcanza 0.023 cm s^{-1} .

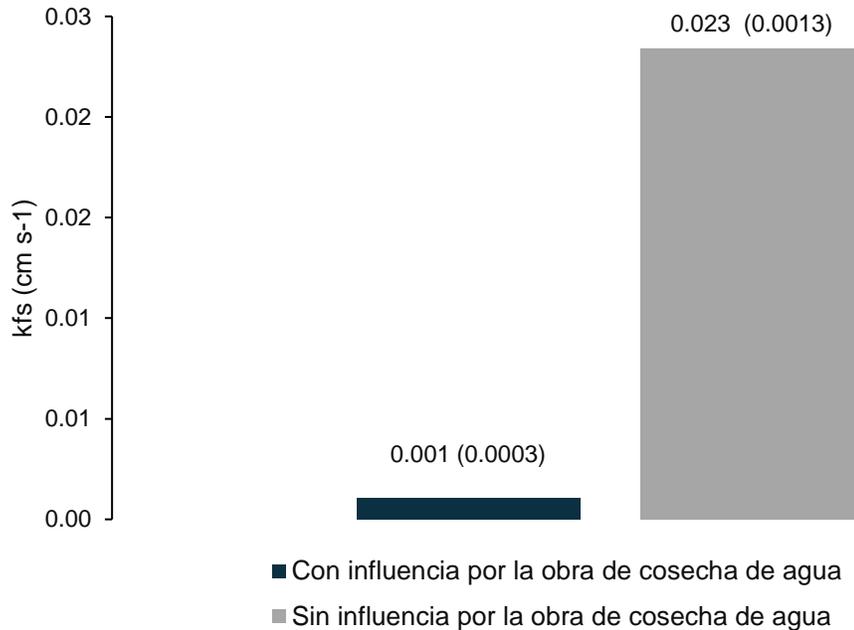
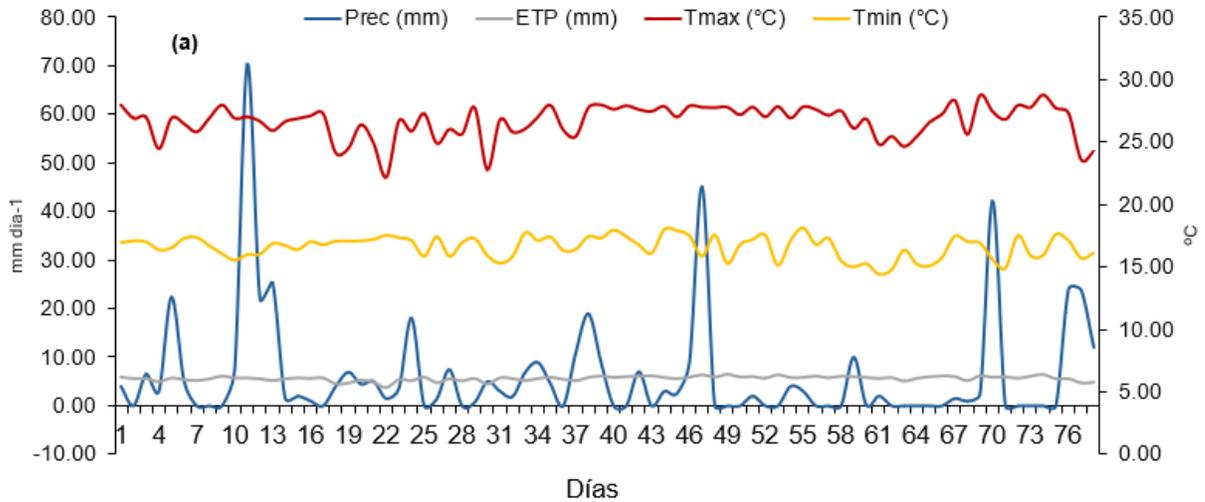


Figura 11. Resultados de las pruebas de conductividad hidráulica saturada (K_{fs}) en el área con y sin influencia de la obra de cosecha de agua (entre paréntesis error estándar).

3.3. Condiciones climáticas durante el ensayo

Durante el período del ensayo, se registró un acumulado pluviométrico de 486.2 mm , con una media de 6.2 mm día^{-1} . La precipitación presentó una alta variabilidad temporal, con un rango que osciló entre 0 y 70.1 mm día^{-1} . Este patrón irregular, caracterizado por episodios de lluvias intensas separados por largos períodos de baja intensidad ($<10 \text{ mm día}^{-1}$), contrasta con el comportamiento de la evapotranspiración potencial, que mostró un patrón más regular, con un acumulado total de 317.51 mm , una media diaria de 4.1 mm , y valores extremos de 5.0 y 2.6 mm día^{-1} (Figura 12).

En cuanto a las temperaturas, presentaron una variabilidad diaria relativamente baja ($CV < 6\%$, $DS < 1.5^\circ\text{C}$). Las temperaturas máximas y mínimas oscilaron en promedio entre 26.7°C y 16.6°C , lo cual representa una amplitud térmica de 10.1°C . Los registros máximos y mínimos durante el ensayo fueron de 28.8°C y 14.4°C , respectivamente.



(b)

Variables	Medidas de resumen				
	Media	CV (%)	DS	Máximo	Mínimo
Tmax (°C)	26.7	4.9	1.3	28.8	22.2
Tmin (°C)	16.6	5.5	0.9	18.1	14.4
Prec (mm)	6.2	188.3	11.6	70.1	0.0
ETP (mm)	4.1	10.3	0.4	5.0	2.6

Figura 12. (a) Distribución temporal de las variables climáticas durante el periodo del ensayo, (b) Estadísticos descriptivos.

3.4. Contenido de humedad en el suelo ($m^3 m^{-3}$)

En la Figura 13, se muestra el comportamiento del contenido de humedad volumétrico en cada profundidad del suelo. En términos generales, los resultados muestran que el T0 sin obra exhibe valores menos variables en comparación con los tratamientos con obra evaluados que presentan un comportamiento marcado por picos de humedad notablemente altos con respecto a su valor promedio. Por ejemplo, en la profundidad de 0-15 cm, el T0 sin obra mantiene valores de humedad más constantes que oscilan en un rango de 0.34 y $0.55 m^3 m^{-3}$ con un coeficiente de variación de 10.3%.

En contraste, los tratamientos con obra (T1, T2 y T3) presentan fluctuaciones mayores. El T1 con obra registra un contenido de humedad máximo de $0.57 m^3 m^{-3}$ y un mínimo de $0.22 m^3 m^{-3}$, con un CV de 12.0%. Con respecto al T2 y T3 con obra, alcanzan valores máximos de $0.49 m^3 m^{-3}$ y $0.54 m^3 m^{-3}$, respectivamente, y mínimos de $0.24 m^3 m^{-3}$ y $0.25 m^3 m^{-3}$, con CV de 8.6% y 12.2%. Si bien en la capa de 0-15 cm el T1 con obra presenta el valor más alto de humedad ($0.57 m^3 m^{-3}$), el T0 sin obra muestra valores más estables con un promedio que se encuentra notablemente por encima de los valores de este tratamiento.

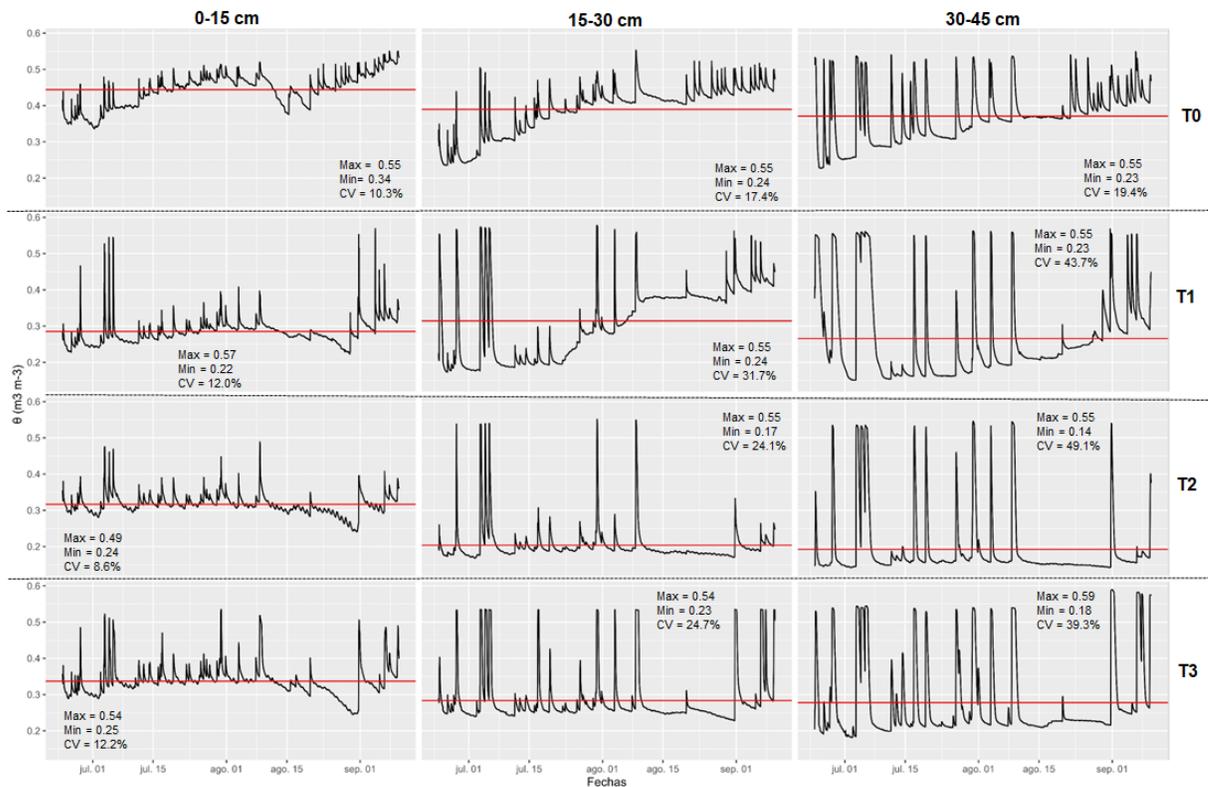


Figura 13. Distribución de la humedad del suelo ($m^3 m^{-3}$) a las tres profundidades. La línea roja indica el promedio (T0: sin obra, T1: con obra a 5 m, T2: con obra a 7m, T3: con obra a 16m).

A la profundidad de 15-30 cm, el T0 sin obra y el T1 con obra exhiben un rango de humedad entre $0.24 m^3 m^{-3}$ y $0.55 m^3 m^{-3}$, con un CV de 17.4% y 31.7%. El T2 con obra presenta valores mínimos y máximos de $0.17 m^3 m^{-3}$ y $0.55 m^3 m^{-3}$, respectivamente, y un CV de 24.1%. La humedad en el T3 con obra a esta profundidad oscila entre $0.23 m^3 m^{-3}$ y $0.54 m^3 m^{-3}$ y una variabilidad del 24.7%.

Para la profundidad de 30-45 cm, el T0 sin obra y el T1 con obra presentaron un contenido de humedad entre $0.23 m^3 m^{-3}$ y $0.55 m^3 m^{-3}$, con un CV de un 19.4% y un 43.7%. La humedad en el T2 con obra fluctúa entre $0.14 m^3 m^{-3}$ y $0.55 m^3 m^{-3}$. En relación con el T3 con obra, este presentó el mayor valor máximo de humedad correspondiente a $0.59 m^3 m^{-3}$ y un CV de 39.3%.

3.5. Correlación entre la precipitación y la humedad del suelo

Los resultados del análisis de correlación entre la precipitación diaria (mm) y los contenidos de humedad volumétrico ($m^3 m^{-3}$) a las tres profundidades que se muestran en la figura 14, indican una correlación positiva entre los contenidos de humedad y el acumulado de lluvia diaria en los T1, T2 y T3 con obra evaluados. Los resultados de la prueba de hipótesis muestran que el nivel de significancia entre las dos variables oscila entre 0.01 y 0.05 en los tratamientos con obra, excepto en T1 con obra a los 30cm, donde no se detectó significancia estadística. A excepción del T1 con obra, los resultados revelan que la fuerza de la correlación es mayor en los primeros dos horizontes, cuyo coeficiente se cataloga como un valor moderado.

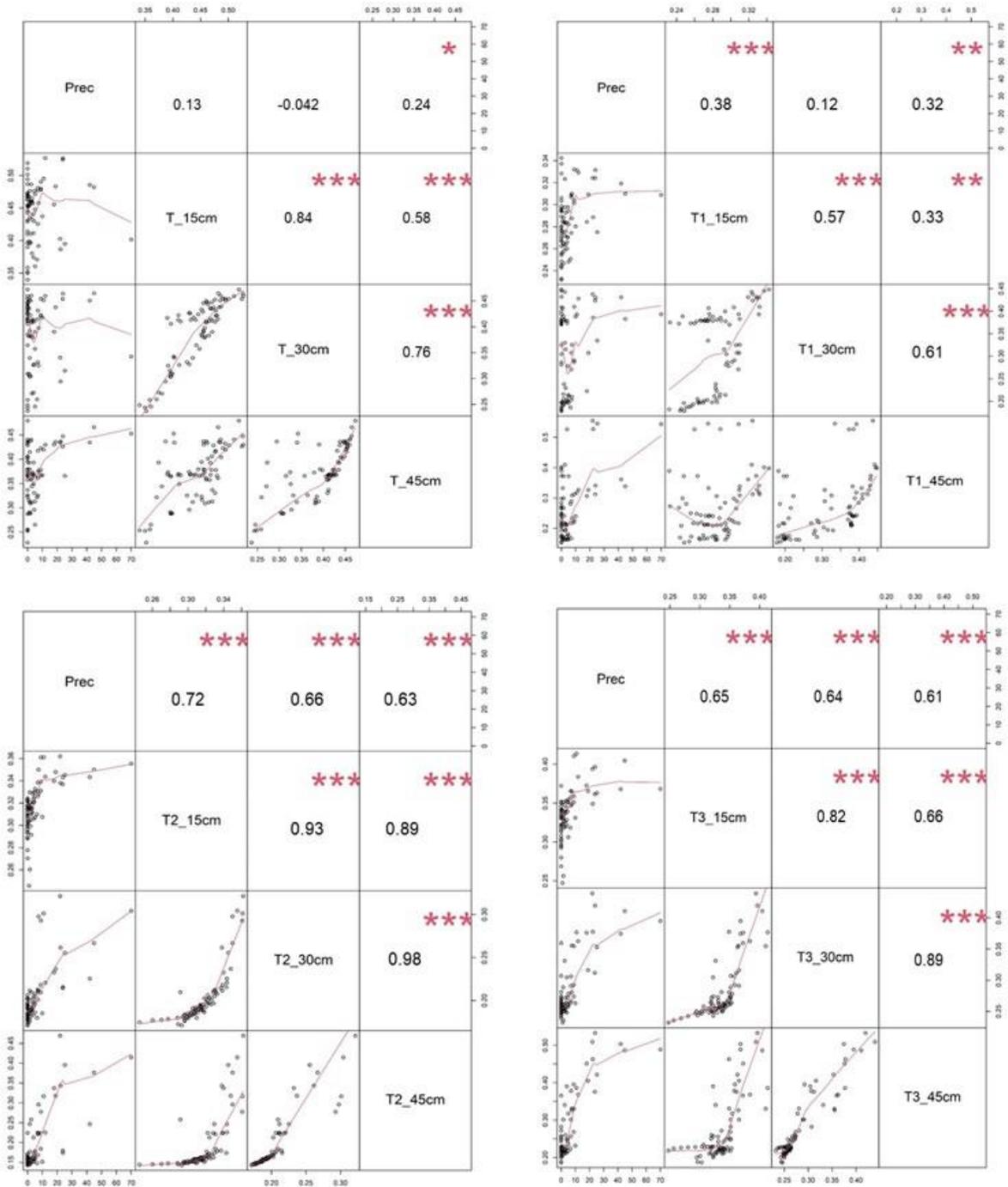


Figura 14. Matriz de correlación de Spearman entre la precipitación (mm) y los contenidos de humedad volumétricos ($m^3 m^{-3}$) en los cuatro puntos de muestreo (significancia representada por los asteriscos). (a): T0: sin obra, (b): T1: con obra, (c): T2: con obra y (d): T3: con obra. Nota: $p < 0.1^*$, $p < 0.05^{**}$, $p < 0.01^{***}$

Al analizar las asociaciones entre los contenidos de humedad a cada profundidad, se evidencia la correlación espacial en este tipo de variables, ya que las capas de suelo adyacentes presentan una alta y mayor correlación positiva que las capas más alejadas. No obstante, independientemente de la distancia, los coeficientes oscilan entre 0.58 y 0.98, los cuales indican una correlación entre moderada y muy fuerte, la cual es estadísticamente significativa ($p < 0.01$). En cuanto al T0 sin obra, en la matriz se observa que la precipitación no muestra

una asociación con los contenidos de humedad de las dos primeras capas de este punto de muestreo, no obstante, refleja una asociación positiva baja (0.24) y significativa ($p < 0.1$) con los contenidos de humedad registrados a la profundidad de 30-45 cm. Además, se observa la misma tendencia que en los tratamientos con obra en cuanto a la correlación espacial entre los contenidos de humedad a cada profundidad.

3.6. Temperatura del suelo (°C)

En la Figura 13, se muestran los valores y variabilidad de temperatura registrados en los tratamientos con obra y sin obra a las tres profundidades. En primer lugar, se observa que en la capa más superficial (0-15 cm), se registran las mayores fluctuaciones, con temperaturas que varían con respecto a su media entre 5 % y 10 %. En esta capa, el T0 sin obra presenta las temperaturas más altas, con un promedio de 23.8°C, en cambio, el T2 con obra registra las temperaturas más bajas, con una media de 22.4°C.

Si bien los datos fluctúan considerablemente a esta profundidad en todos los puntos de medición, se observa una menor variabilidad de los datos en el T1 con obra, que se encuentra más próximo a la obra de cosecha de agua, cuyos datos oscilan durante el periodo analizado entre 23°C y 25°C. En contraste, en los demás puntos de medición, las fluctuaciones se mantienen entre un rango de 20°C y 28°C, lo que sugiere una mayor amplitud térmica.

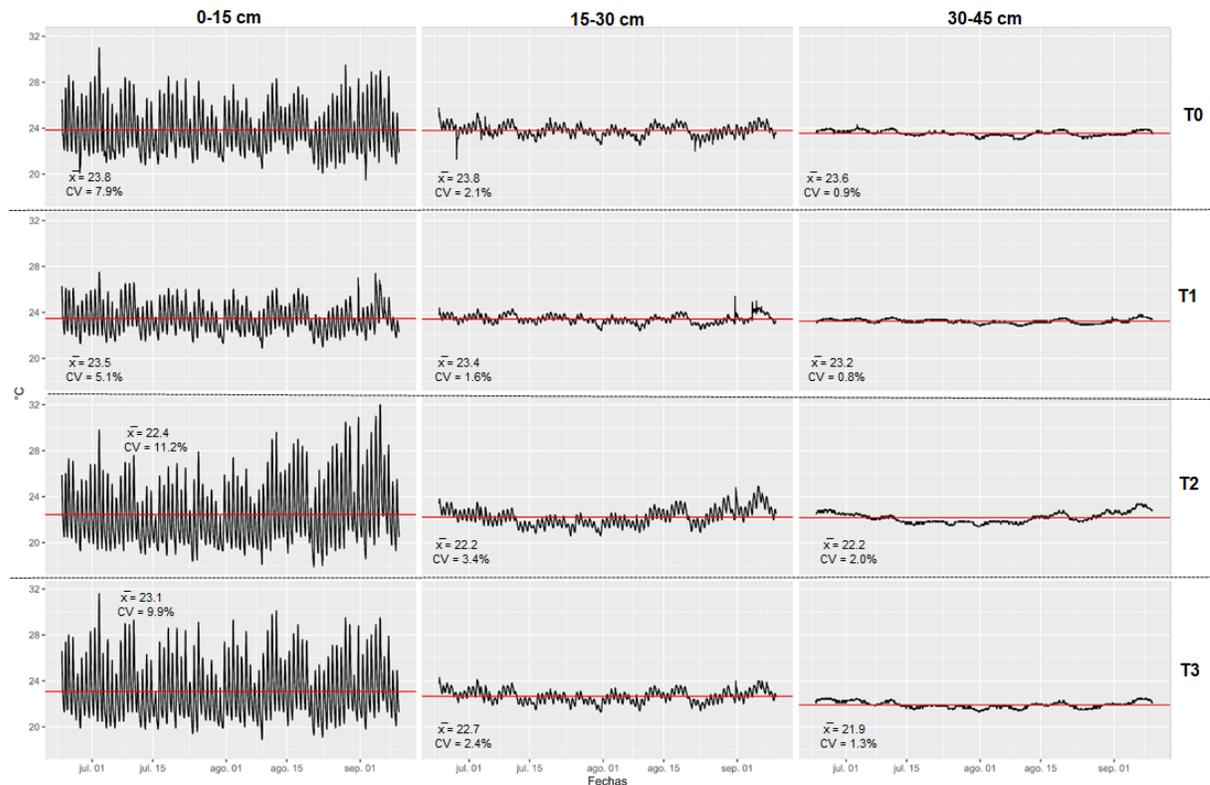


Figura 15. Distribución de la temperatura del suelo a las tres profundidades (T0: sin obra, T1: con obra, T2: con obra, T3: con obra).

En las demás capas de suelo, las temperaturas presentan una estabilidad notable en los cuatro puntos de medición con un coeficiente de variación menor de 2.1 %. Sin embargo, se observan algunas diferencias en cuanto a los valores promedio. Por ejemplo, el T0 sin obra registró tanto en la capa de 15-30 cm como en la de 30-45 cm, las temperaturas más altas con 23.8°C y 23.6°C respectivamente. En cambio, el T2 con obra presentó la temperatura promedio más baja (22.2°C) en la capa de 15-30 cm, mientras que en la capa más profunda el T3 con obra

exhibió el valor promedio más bajo (21.9°C).

3.7. Balance hídrico del suelo

En la Figura 16, se muestra la serie temporal de los resultados del balance hídrico de suelo de todos los tratamientos, a las tres profundidades evaluadas. En primer lugar, se observa una tendencia similar en las reservas de humedad en todas las combinaciones. Sin embargo, al analizar los valores promedio, el T0 sin obra registra una mayor lámina de agua en comparación con los tratamientos con obra.

Además, se observa una menor variabilidad, especialmente a las profundidades de 30-45 cm, la cual presenta el coeficiente de variación más bajo (28.2 %). En contraste, se observa una mayor variabilidad en los tratamientos con obra, especialmente en las capas más profundas.

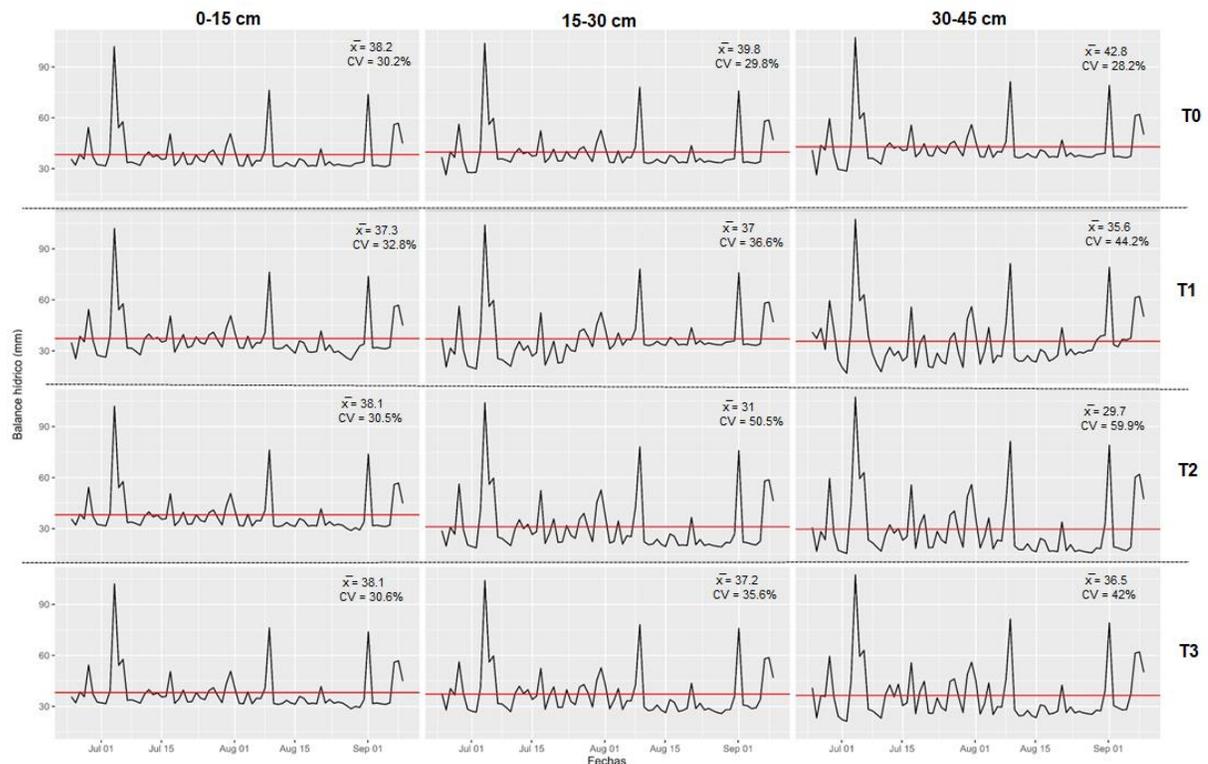


Figura 16. Resultados del balance hídrico del suelo a las tres profundidades (T0: sin obra, T1: con obra, T2: con obra, T3: con obra).

Al observar la distribución temporal de los resultados del balance, se observa que los contenidos de humedad de los tratamientos con obra presentan picos en momentos específicos que superan los 60 mm día⁻¹ y 90 mm día⁻¹. No obstante, los valores se mantienen generalmente por debajo de los 30 mm día⁻¹ durante la mayor parte del periodo analizado, en especial, en las profundidades superiores a los 15 cm. Si bien, el T0 sin obra presenta un comportamiento similar, los valores del balance fluctúan en menor grado y se mantienen consistentemente por encima de los 30 mm, lo que sugiere mayores reservas de humedad en este punto de medición.

Al comparar los datos por profundidad, se observa que en la capa de 0-15 cm los contenidos de humedad son relativamente similares en los tratamientos con obra y en el T0 sin obra; no obstante, en las demás capas se registran valores notablemente más altos en este último, especialmente, en la capa de 30-45 cm, donde se observa la mayor lámina de agua promedio (42.8 mm). Por el contrario, en el T2 con obra se registran los contenidos de humedad más

bajos, tanto en la capa de 15-30 cm (31 mm) como de 30-45 cm (29.7 mm).

4. Discusión

4.1. Análisis de las condiciones edafoclimáticas

La retención y el movimiento del agua dentro del suelo están estrechamente relacionadas con la textura y la estructura (Magdic *et al.*, 2022). Por un lado, la textura del suelo, referida a su composición granulométrica en términos de proporción de partículas de arena, limo y arcilla, determina el tamaño y número de poros en el suelo, que a su vez definen su potencial mátrico. Por otro lado, la estructura se refiere a la disposición de estas partículas, incluida la materia orgánica, en unidades estables llamadas agregados que determinan tanto el tamaño como la distribución y conectividad del espacio poroso, lo cual afecta principalmente la circulación del agua dentro del perfil (Bautista, 2020).

En el caso de los suelos del área de estudio, clasificados con texturas de tipo franco arenoso en la primera capa (0-15 cm) y franco arcillo-arenoso en las demás capas (15-30 cm y 30-45 cm) y que además presentan una estructura predominantemente granular, la retención y el movimiento del agua en el suelo se caracteriza, en términos generales, por combinar un buen drenaje con una buena capacidad de retención. Lo anterior proporciona, desde un punto de vista físico, condiciones adecuadas para el crecimiento de las plantas. Adicionalmente, estos suelos poseen altos contenidos de materia orgánica (4.40 %), lo que además de contribuir a su fertilidad química, mejora la estructura e influye en los bajos valores de densidad aparente registrados en las tres capas ($<1.0 \text{ g cm}^{-3}$), los cuales, a su vez, se asocian a los valores altos de porosidad ($>60 \%$) que presentan estos suelos.

Los valores de humedad a capacidad de campo y punto de marchitez registrados en las tres profundidades se encuentran dentro de los rangos típicos reportados para suelos franco-arenosos y franco-arcillosos. Según Huntley (2023), este tipo de suelos suelen presentar humedades a punto de marchitez entre 8-15 % y capacidad de campo entre 18-32 %, lo cual resulta en un rango de humedad disponible que oscila entre 10-17 %. Para los cultivos, esta humedad es la más importante, ya que representa la reserva de agua en el suelo que satisface los requerimientos hídricos hasta con un 50 % de su capacidad.

En cuanto a la conductividad hidráulica, esta propiedad se evalúa a partir de la velocidad de infiltración, y varía en función de la textura de suelo y el contenido de humedad presente. Esto quiere decir que alcanza su valor máximo cuando el suelo está seco, y disminuye gradualmente a medida que el suelo se humedece. De esta manera, si la humedad es constante, la velocidad de infiltración disminuye hasta un valor mínimo con el paso del tiempo (Jordán, 2005). A este valor se le denomina infiltración básica, y representa el límite del agua que el suelo es capaz de absorber, ya sea de la precipitación o la irrigación. Es decir, si la tasa de precipitación o irrigación supera a la velocidad de infiltración básica, se producirá escorrentía superficial (Rivera & Dallatorre, 2018).

En el caso de los resultados de la conductividad hidráulica obtenidos con el infiltrómetro en los dos puntos de muestreo, se observó que este valor es notablemente mayor en el área fuera de influencia de la obra con respecto al área donde se localizan los T1, T2 y T3 con obra. Según Forsythe (1980), en el caso del T0 (sin obra), la velocidad de la conductividad se clasifica como moderadamente lenta, en cambio, el área de los tratamientos con obra (T1, T2 y T3) se cataloga con una conductividad muy lenta. Si bien los resultados del muestreo de suelo indican que estas áreas con y sin obra poseen una textura similar, es probable que el área circundante a la obra se encuentre más compactada en comparación con el área sin obra, debido a que, en este sitio, se concentran actividades de preparación de suelo y circulación

de los trabajadores de campo, lo cual provoca un incremento en la compactación que puede disminuir la capacidad de infiltración; es decir, el agua tarda más tiempo en infiltrarse, debido a una mayor solidez del terreno (Rivera & Dallatorre, 2018).

No obstante, también es probable que este comportamiento esté influenciado por una mayor proporción de partículas más gruesas (limo y/o arena) en la capa superficial del área del T0 sin obra. En este sentido, algunos autores recomiendan que para obtener una representatividad adecuada de un terreno menor a 1 ha con características relativamente similares, se pueden coleccionar como mínimo entre 6 a 12 submuestras para preparar una muestra compuesta y obtener hasta un 80 % de precisión (Mendoza y Espinoza, 2017). No obstante, es probable que, desde el punto de vista físico, la topografía y el tipo de cobertura del terreno influya en una mayor variabilidad de los suelos, lo que sugiere que el muestreo debería considerar la subdivisión por zonas o lotes dentro de la finca.

Por ejemplo, el suelo en los T1, T2 y T3 con obra posee una pendiente cóncava, lo cual se traduce en menores tasas de erosión y mayor acumulación de arcilla y materia orgánica en la capa superficial. Esta condición favorece una menor conductividad hidráulica. Por el contrario, el suelo en el T0 sin obra presenta una pendiente más larga y de forma convexa, lo cual le confiere una mayor susceptibilidad a la erosión hídrica (Figura 17). En este caso, es bastante común una mayor acumulación de arena y limo, lo cual se relaciona con una velocidad de infiltración más rápida en comparación con el suelo donde se localizan los tratamientos con obra (Meliyo *et al.*, 2018; Bagio *et al.*, 2017).

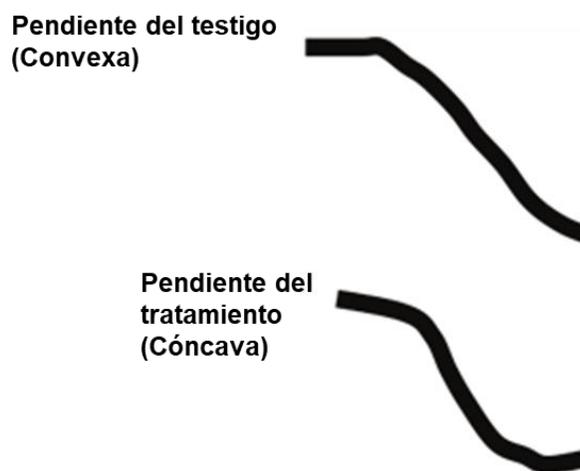


Figura 17. Pendiente de los puntos de muestreo.

Estas condiciones también podrían explicar los valores promedio de temperatura del suelo más elevados observados en el T0 sin obra. Esto se debe a que una mayor presencia de partículas gruesas en el perfil se traduce en una permeabilidad más alta e incremento del espacio poroso donde se produce una mayor evaporación y aireación, lo cual provoca un mayor calentamiento del suelo (Jordán, 2005; Licht & Al-Kaisi, 2005).

Con respecto a los resultados del contenido de humedad volumétrico, es probable que los picos de humedad notablemente altos observados en los tratamientos con obra (T1, T2 y T3), estén influenciados por la cercanía a la obra y su posición en la pendiente. En este sentido, se asume que debido a que la obra se llena con relativa frecuencia debido al uso constante que se le da para el riego de los cultivos, el llenado a su capacidad máxima ocasiona que dentro del vaso, el agua permee a través de las paredes del reservorio por la presión ejercida por la misma agua, redistribuyéndose en el perfil, y extendiéndose por gravedad en los horizontes de 15-30 cm y 30-45 cm de los T2 y T3 que se encuentran en la parte más baja de la pendiente

y que exhiben los picos más altos con respecto a su valor promedio (Svetlitchnyi *et al.*, 2003).

También es probable que la concentración de las pérdidas por deriva del sistema de riego por aspersión en el área de los tratamientos con obra debido a su cercanía al área de cultivos podría estar generando una entrada adicional de humedad en esta zona que influencia la presencia de los picos de humedad observados. Por el contrario, en el T0 sin obra no muestra estas variaciones tan abruptas, lo cual indica que en ausencia del efecto de la obra y del sistema de riego, los niveles de humedad son más estables.

En este sentido, Sehler *et al.* (2019) señalan que la interacción entre la humedad edáfica y la precipitación es compleja, y puede variar en dirección de correlación (positiva o negativa) y magnitud (débil o fuerte). En el caso del presente estudio, donde los resultados del análisis de correlación indican una dirección positiva, moderada y significativa en la mayoría de las combinaciones, concuerda con otros estudios que han identificado algunos factores físicos que generan este efecto como la intensidad del albedo y la proporción entre la energía utilizada para calentar el aire y la que se emplea en evapotranspiración (Findell & Eltahir, 1997; Eltahir 1998; Zheng & Eltahir 1998). Estos estudios apoyan la hipótesis de que un suelo más húmedo puede proporcionar abundante humedad a la atmósfera, lo cual mejora la precipitación.

Estas comparaciones sugieren la relevancia de analizar las variaciones en el microclima local y su relación con la dinámica de la humedad del suelo y la atmósfera. Si bien los datos de evapotranspiración potencial indican un promedio diario de 4.1 mm en el área de estudio, es probable, que incluso a nivel de finca, existan variaciones locales con respecto a este valor.

4.2. Balance hídrico de suelos

El balance hídrico de suelos se basa en el principio de la conservación de la materia, es decir, el agua que infiltra en el suelo es igual a la almacenada en su perfil más el agua que sale de este a través de la evapotranspiración y la percolación profunda (Schosinsky, 2006). Una vez que el agua generada por la lluvia infiltra, se puede calcular el balance hídrico con base en datos de profundidad del perfil, escorrentía superficial, evapotranspiración, velocidad de infiltración, capacidad de campo y punto de marchitez permanente; estos dos últimos, definen la cantidad de agua disponible para las plantas en condiciones no saturadas (Herrera y Moreno, 2022).

En este marco, los resultados de este estudio indican que el área de la finca fuera de la influencia de la obra de cosecha de agua presenta un balance hídrico superior en comparación con los tres tratamientos evaluados, en especial, en las capas más profundas, lo que puede atribuirse, además de las potenciales variaciones en las condiciones microclimáticas y pendiente, a un mayor contenido de arcilla iluvial en las mismas posiciones. En términos sencillos, este proceso se refiere al transporte de la arcilla de los horizontes superficiales a horizontes más profundos del perfil donde tienden a acumularse. Este proceso está determinado fundamentalmente por el agua de lluvia, el cual se infiltra movilizándolo a las arcillas de los horizontes superiores en forma de suspensión a través de los macroporos hasta que se deposita en horizontes más profundos (Ibañez Asensio & Moreno Ramón, 2019).

Este planteamiento contribuye a explicar las variaciones en la conductividad hidráulica y el balance de humedad entre las áreas. La mayor conductividad en el área sin influencia de la obra, influenciada por la presencia de una capa eluvial, facilita la infiltración y acelera la recarga de los horizontes inferiores. Además, la mayor cantidad de arcilla por debajo de los 15 cm aumenta su capacidad de retención de agua. En este sentido, si bien los tratamientos con obra pueden verse influenciados por la redistribución de humedad que permea a través del reservorio y que tiende a concentrarse en las posiciones más bajas de la pendiente donde se

localizan los T2 y T3 con obra, el área sin influencia de la obra presenta condiciones más favorables para la infiltración y retención de agua debido a su textura y procesos de formación.

Otro factor decisivo en los resultados del balance hídrico está vinculado con la posición de los tratamientos a lo largo de la pendiente del terreno. Según Magdić *et al.* (2022), la posición en la pendiente, es decir, la posición de altura relativa a lo largo de la ladera tiene una influencia indirecta significativa en las propiedades fisicoquímicas del suelo, al controlar el movimiento del agua y el material erosionado en una ladera y contribuir a las diferencias espaciales de las propiedades del suelo. Por ejemplo, los cambios en la inclinación afectan la intensidad de los procesos de ganancia y pérdida de suelo en los horizontes superficiales. En este marco, el área sin influencia de la obra se encuentra adyacente a un segmento de la ladera ubicado en una posición más alta que divide el flujo del escurrimiento superficial hacia el área de los T1, T2 y T3 con obra y el área sin influencia de la obra.

Debido a que el área próxima a los tratamientos con obra (T1, T2 y T3) está sometida constantemente a tareas de labranza para el establecimiento de cultivos en hileras que siguen la dirección de la pendiente, este manejo forma canales, los cuales facilitan que el agua dirigida a esa sección se pierda por escorrentía superficial. En cambio, al no existir estas perturbaciones en el área sin influencia de la obra, la mayor parte de esta escorrentía se concentra en este sitio, lo cual representa mayor disponibilidad de agua para infiltrar y acelerar la recarga del perfil.

Para sintetizar, en la Figura 18, se representan los factores identificados que determinan las variaciones en el balance hídrico de suelos en los tratamientos con obra (T1, T2 y T3) y en el T0 sin obra.

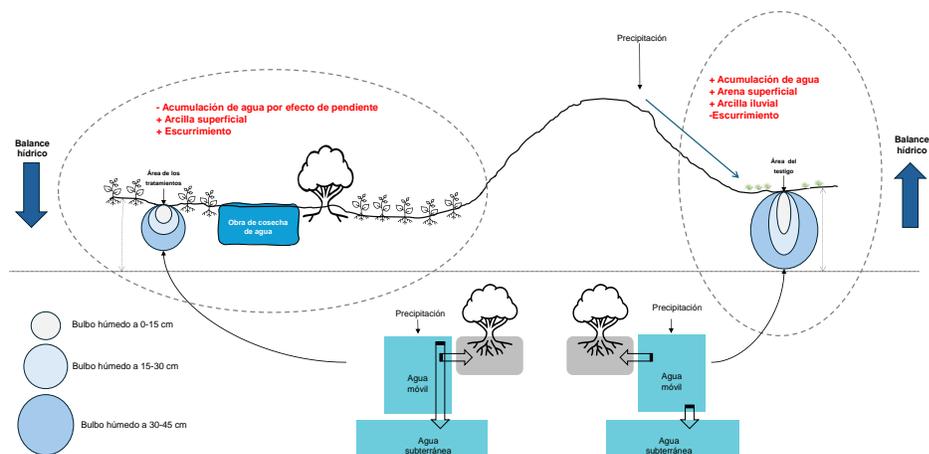


Figura 18. Síntesis de los principales factores determinantes de las variaciones del balance hídrico de suelo en el área de los T1, T2 y T3 con obra y el T0: sin obra (Fuente: Adaptado de Brooks *et al.*, 2010).

Las diferencias en la pendiente, tanto en forma como en posición, influyen en la distribución de la humedad y la composición del suelo. La zona de los tratamientos con obra se asocia con mayores tasas de escorrentía y una mayor acumulación de arcilla superficial, mientras que el área sin influencia de la obra presenta mayor acumulación de arcilla iluvial y arena superficial, lo cual facilita una mayor infiltración, retención de agua y menores tasas de escurrimiento. Estos factores, combinados con la estructura del suelo y las prácticas de manejo, afectan las reservas de agua y la dinámica térmica en ambos puntos de muestreo.

5. Conclusiones

Los resultados indican que la obra de cosecha de agua tiene un impacto significativo en la dinámica de agua en el suelo, lo cual sugiere que la obra podría estar influenciando en el contenido de humedad en el suelo, particularmente en las capas más profundas que están más allá de los puntos de muestreo de los sensores utilizados.

Los tratamientos más cercanos a la obra de cosecha de agua presentaron los picos de humedad más altos. Esto puede estar influenciado por la presión que ejerce el agua almacenada en la obra y la dirección de la pendiente que redistribuye el agua en el suelo circundante.

Los análisis estadísticos evidencian que la precipitación tiene una alta correlación con la humedad presente en sitios próximos a la obra de cosecha de agua. Por su parte, el mayor contraste de esta correlación se da en la capa superficial (0-15 cm) donde se evidencia que en zonas sin presencia de la obra de cosecha de agua la correlación entre humedad del suelo y precipitación es mínima.

Se evidencia que, a mayor profundidad, los rangos de temperatura van disminuyendo; sin embargo, las menores fluctuaciones en los datos se dan en la capa más superficial (0-15 cm) correspondiente al T1 con obra, que se encuentra más cercano a la obra de cosecha de agua. Los datos correspondientes al T2 con obra en las profundidades de (0-15 cm y 15-30 cm) y el T3 con obra a la profundidad de (30-45 cm) fueron quienes presentaron los valores más bajos de temperatura.

Respecto al comportamiento de los datos del balance hídrico, el área sin influencia de la obra presentó una menor variabilidad en sus datos en comparación a los tratamientos cercanos a la obra de cosecha de agua (T1, T2, T3), especialmente a las mayores profundidades (30 - 45 cm).

6. Recomendaciones

1. Dado que es probable que la obra de cosecha de agua influya en los contenidos de humedad en las capas más profundas del suelo, se recomienda instalar sensores a mayores profundidades para evaluar con precisión el alcance de esta influencia. Esto permitiría obtener una perspectiva más completa del comportamiento hídrico, particularmente en áreas más alejadas de la superficie.
2. Si se toma en cuenta la influencia de la pendiente, en magnitud, forma y posición en el movimiento del agua, ya sea superficial como dentro del suelo, se recomienda profundizar más en futuras investigaciones sobre cómo estos factores afectan la dinámica del balance hídrico a escala de finca de manera independiente.
3. Los resultados muestran que la correlación en la precipitación y humedad del suelo es más evidente en los sitios próximos a la obra de cosecha de agua. Por lo tanto, se recomienda realizar estudios exploratorios que analicen esta relación a diferentes profundidades y distancias con respecto a la obra, para verificar si el patrón observado se mantiene en otras condiciones y profundidades.

7. Literatura citada

- Awulachew, S. B., Merrey, D. J., Kamara, A. B., van Koppen, B., Penning de Vries, F. W. T., & Boelee, E. (2005). Experiences and opportunities for promoting small-scale/micro irrigation and rainwater harvesting for food security in Ethiopia. International Water Management Institute. <https://hdl.handle.net/10568/39347>
- Calianno, M., Fallot, J.-M., Ben Fraj, T., Ben Ouedzou, H., Reynard, E., Milano, M., Abbassi, M., Ghram Messedi, A., & Adatte, T. (2020). Benefits of Water-Harvesting Systems (Jessour) on Soil Water Retention in Southeast Tunisia. *Water*, 12(1), 295. <https://doi.org/10.3390/w12010295>
- Bagio, B., Bertol, I., Wolschick, N. H., Schneiders, D., & Santos, M. A. do N. dos. (2017). Water Erosion in Different Slope Lengths on Bare Soil. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 41, e0160132. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160132>
- Bautista, N. (2020). Propiedades físicas del suelo, factor de prioritaria atención dentro de la productividad agrícola. [Bachelor Thesis, Machala; Universidad Nacional Abierta y a Distancia "UNAD"]. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/36739/ngbautistan.pdf>
- Brooks, R., Barnard, H. R., Coulombe, R., & McDonnell, J. J. (2010). Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate. *Nature Geoscience*, 3(2), 100-104. <https://doi.org/10.1038/ngeo722>
- Dalezios, N. R., Angelakis, A. N., & Eslamian, S. (2018). Water scarcity management: Part 1: methodological framework. *International Journal of Global Environmental Issues*, 17(1), 1-40. <https://doi.org/10.1504/IJGENVI.2018.090629>
- Elgert, L., Austin, P., & Picchione, K. (2016). Improving water security through rainwater harvesting: A case from Guatemala and the potential for expanding coverage. *International Journal of Water Resources Development*, 32(5), 765-780. <https://doi.org/10.1080/07900627.2015.1104499>
- Eltahir, E. A. B. (1998). A Soil Moisture–Rainfall Feedback Mechanism: 1. Theory and observations. *Water Resources Research*, 34(4), 765-776. <https://doi.org/10.1029/97WR03499>
- Emile, R., Clammer, J. R., Jayaswal, P., & Sharma, P. (2022). Addressing water scarcity in developing country contexts: A socio-cultural approach. *Humanities and Social Sciences Communications*, 9(1), 1-10. <https://doi.org/10.1057/s41599-022-01140-5>
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Findell, K. L., & Eltahir, E. A. B. (1997). An analysis of the soil moisture-rainfall feedback, based on direct observations from Illinois. *Water Resources Research*, 33(4), 725-735. <https://doi.org/10.1029/96WR03756>
- Hargreaves, G. H. (1994). Defining and Using Reference Evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(6), 1132-1139. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1994\)120:6\(1132\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1994)120:6(1132))
- Herrera Talavera, K. Y., & Moreno Rivas, D. K. (2022). Incidencia del uso de suelo en el Balance Hídrico de Suelo propuesto por Schosinsky [Universidad Nacional Agraria].

<https://repositorio.una.edu.ni/4601/1/tnp10h565.pdf>

- Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations*. Academic Press, Waltham. <https://shop.elsevier.com/books/environmental-soil-physics/hillel/978-0-12-348525-0>
- Horton, J. H., & Hawkins, R. H. (1965). Flow path of rain from the soil surface to the water table. *Soil Science*, 100(6), 377.
- Huntley, B. J. (2023). Soil, Water and Nutrients. En B. J. Huntley (Ed.), *Ecology of Angola: Terrestrial Biomes and Ecoregions* (pp. 127-147). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18923-4_6
- Ibañez Asensio, S., & Moreno Ramón, H. (2019). *Procesos formadores del suelo: Argiluviación*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/122818>
- Imroatul C., J., Syahril Badri Kusuma, M., Cahyono, M., Kardhana, H., & Martokusumo, W. (2017). *Rainwater Harvesting System Implementation for Domestic Water Use: The Environment and Financial Benefits*. Springer.
- Jordán, A. (2005). *Manual de edafología*. Universidad de Sevilla. https://www.academia.edu/6005589/Manual_de_edafologia_jordan?work_id=10330368
- Licht, M. A., & Al-Kaisi, M. (2005). Strip-tillage effect on seedbed soil temperature and other soil physical properties. *Soil and Tillage Research*, 80(1), 233-249. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.017>
- Loaiza, & Japón, J. (2023). Efectos del cambio de cobertura vegetal en el caudal superficial de la subcuenca del río Casacay, El Oro [Bachelor Thesis, Machala; Universidad Técnica de Machala]. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/22821>
- Magdić, I., Safner, T., Rubinić, V., Rutić, F., Husnjak, S., & Filipović, V. (2022). Effect of slope position on soil properties and soil moisture regime of Stagnosol in the vineyard. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 70(1), 62-73. <https://doi.org/10.2478/johh-2021-0037>
- Mancosu, N., Snyder, R. L., Kyriakakis, G., & Spano, D. (2015). Water Scarcity and Future Challenges for Food Production. *Water*, 7(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/w7030975>
- Meliyo, J., Masuki, K., Msanya, B., Kimaro, D., & Mulungu, L. (2018). *Ecological Biogeography of West Usambara Mountains: A Study on the Influence of Abiotic Factors to Spatial Distribution of Plant and Animal Species*.
- Mendoza, R., y Espinoza, A. (2017). *Guía de muestreo de suelos*. UNA. <https://repositorio.una.edu.ni/3613/1/P33M539.pdf>
- Milly, P. C. D. (1994). Climate, soil water storage, and the average annual water balance. *Water Resources Research*, 30(7), 2143-2156. <https://doi.org/10.1029/94WR00586>
- Morante-Carballo, F., Montalván-Burbano, N., Quiñonez-Barzola, X., Jaya-Montalvo, M., & Carrión-Mero, P. (2022). What Do We Know about Water Scarcity in Semi-Arid Zones? A Global

Analysis and Research Trends. *Water*, 14(17), Article 17. <https://doi.org/10.3390/w14172685>

- Niampira, N. G. B. (2020). *Propiedades físicas del suelo, factor de prioritaria atención dentro de la productividad* [Universidad Nacional Abierta y a Distancia "UNAD"]. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/36739/ngbautistan.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2012). *GUÍA PARA LA DESCRIPCIÓN DE SUELOS*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b54d0348-dfce-413c-bd5d-142b3a14a049/content>
- Ritchie, J. T. (1998). Soil water balance and plant water stress. En G. Y. Tsuji, G. Hoogenboom, & P. K. Thornton (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production* (pp. 41-54). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4_3
- Rivera, J. S. Ú., & Dallatorre, Y. D. (2018). La infiltración del agua en los suelos y componentes artificiales y materia orgánica que se utilizan en ellos para la agricultura. *Revista iberoamericana de bioeconomía y cambio climático*, 4(7), Article 7. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v4i7.6299>
- Schosinsky N., G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, 34-35. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i34-35.4223>
- Schosinsky, G., & Losilla, M. (2000). Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. *Revista geológica de América central*, 23. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i23.8579>
- Sehler, R., Li, J., Reager, J., & Ye, H. (2019). Investigating Relationship Between Soil Moisture and Precipitation Globally Using Remote Sensing Observations. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 168(1), 106-118. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2019.03324.x>
- Soto, J. M. D., Gutiérrez, A. D. R., & García, F. P. (2012). *Sistema de Notación Munsell y CIELab como herramienta para evaluación de color en suelos*. 3(1).
- Svetlitchnyi, A. A., Plotnitskiy, S. V., & Stepovaya, O. Y. (2003). Spatial distribution of soil moisture content within catchments and its modelling on the basis of topographic data. *Journal of Hydrology*, 277(1), 50-60. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00083-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00083-0)
- Tzanakakis, V. A., Paranychianakis, N. V., & Angelakis, A. N. (2020). Water Supply and Water Scarcity. *Water*, 12(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/w12092347>
- Verstraeten, W. W., Veroustraete, F., & Feyen, J. (2008). Assessment of Evapotranspiration and Soil Moisture Content Across Different Scales of Observation. *Sensors*, 8(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/s8010070>
- Wang, C., Fu, B., Zhang, L., & Xu, Z. (2019). Soil moisture–plant interactions: An ecohydrological review. *Journal of Soils and Sediments*, 19(1), 1-9. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2167-0>

- Yannopoulos, S., Giannopoulou, I., & Kaiafa-Saropoulou, M. (2019). Investigation of the Current Situation and Prospects for the Development of Rainwater Harvesting as a Tool to Confront Water Scarcity Worldwide. *Water*, 11(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/w11102168>
- Yosef, B. A., & Asmamaw, D. K. (2015). Rainwater harvesting: An option for dry land agriculture in arid and semi-arid Ethiopia. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 7(2), 17-28. <https://doi.org/10.5897/IJWREE2014.0539>
- Zotarelli, L., Dukes, M. D., & Morgan, K. T. (2013). Interpretación del contenido de la humedad del suelo para determinar capacidad de campo y evitar riego excesivo en suelos arenosos utilizando sensores de humedad: AE496, 1/2013. *Edis*, 2013(2).
- Zheng, W., Wang, S., Sprenger, M., Liu, B., & Cao, J. (2019). Response of soil water movement and groundwater recharge to extreme precipitation in a headwater catchment in the North China Plain. *Journal of Hydrology*, 576, 466-477. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.071>
- Zheng, X., & Eltahir, E. A. B. (1998). A Soil Moisture–Rainfall Feedback Mechanism: 2. Numerical experiments. *Water Resources Research*, 34(4), 777-785. <https://doi.org/10.1029/97WR03497>

8. Anexo

Parámetros considerados para el cálculo del balance hídrico según la metodología de Schosinsky (2006)

