

## ANEXOS

### Anexo A.

#### *Proceso y resultados de la revisión de literatura.*

- ***Búsqueda y selección de información***

El proceso de revisión de literatura inició con base a la siguiente pregunta de investigación “¿Cómo se desarrolla actualmente la gestión del agua para riego de una unidad productiva de cebolla larga (*Allium fistulosum*) localizada en el ecosistema de páramo?”. Para dar respuesta a esta pregunta de investigación, se realizó una revisión de literatura centrada en los siguientes tópicos:

- Influencia de las prácticas agrícolas sobre la eficiencia de los sistemas de riego.
- Técnicas de evaluación de eficiencia para los sistemas de riego.
- Necesidades hídricas de los cultivos de cebolla larga.

Adicionalmente, se buscó información relacionada con los problemas asociados a las técnicas inadecuadas de riego y otras prácticas agrícolas que pueda afectar las necesidades hídricas de los cultivos de cebolla larga. La búsqueda de literatura se realizó por medio de las siguientes bases de datos científicas SCOPUS ®, ScienceDirect ® y ASCE ®, debido a que estas contienen las revistas científicas especializadas con el tema de interés (p. ej., *Agricultural Water Management*). Asimismo, se realizó igualmente la búsqueda de documentos en la plataforma de Google Scholar (p. ej., capítulos de libros, artículos de revistas locales, documentos de entes gubernamentales, entre otros).

Las palabras claves empleadas para la búsqueda de información en las bases de datos científicas mencionadas anteriormente se organizaron en tres grupos, esto según el objetivo

(Tabla 1A). Posteriormente se generaron ecuaciones de búsqueda con el objetivo de filtrar y seleccionar la información relevante para la investigación.

**Tabla 1A**

*Palabras clave usadas.*

<b>Objetivo 1</b>	<b>Objetivo 2</b>	<b>Objetivo 3</b>
Paramo	Paramo	Irrigation evaluation
High-Andean	Soil properties	Performance Indicators
Irrigation practices	hydraulic properties	Irrigation performance indices
Water supply	Agriculture	Comparative indicators
Rainfall		

Siguiendo el proceso de filtrado y selección de la información relevante para la investigación, se tuvieron en cuenta los siguientes criterios de inclusión:

- Documentos en idioma inglés o español.
- Documentos publicados en el periodo de tiempo comprendido entre los años 2013 y 2023.
- Tipo de literatura revisada por pares o por instituciones.
- Documentos de tipo artículos de investigación, revisiones, capítulos de libro, publicaciones de congresos y documentos publicados por entes gubernamentales.

Adicionalmente se tuvieron en cuenta los siguientes criterios de exclusión:

- Estimación de las necesidades hídricas de los cultivos mediante el uso de sensores remotos.
- Automatización de los sistemas de riego mediante el uso de inteligencia artificial (ej. Machinelearning, Internet of things)
- Riego de cultivos con aguas recicladas como por ejemplo aguas residuales.

- Mejoras de la calidad del suelo mediante la adición de enmiendas o fertilizantes.

Con base a los criterios de inclusión y exclusión, además de las palabras claves presentadas en la tabla A1, se formaron las siguientes ecuaciones de búsqueda:

#### ***Ecuación objetivo 1***

- ( "High Andean" OR "P\*ramo" ) AND "Agriculture" ( "Irrigation" OR "Water" OR "Water supply" OR "Rainfall" )

#### ***Ecuación objetivo 2***

- ( "Paramo" OR "P\*ramo" OR "High Andean" OR "High-Andean" ) AND ( "Soil properties" OR "hydraulic properties" )

#### ***Ecuación objetivo 3***

- "Irrigation" AND ( "Irrigation evaluation" OR "Performance indicators" OR "Irrigation performance indices" OR "Comparative indicators" ) AND NOT ( "Remote" OR "Model" OR "Maching learning" OR "Internet of things" OR "Waste water" ) )

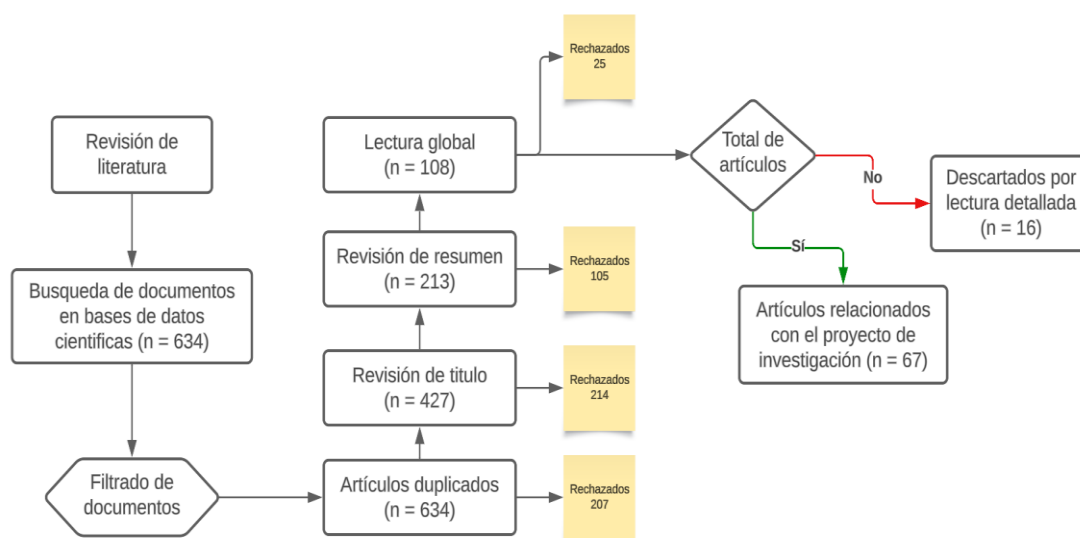
Después de aplicar las ecuaciones de búsqueda en las bases de datos correspondientes, se identificaron un total de 634 artículos que cumplían con los criterios de inclusión y exclusión previamente establecidos. Posteriormente, se realizó un proceso manual de selección de información utilizando el software Excel. A continuación, se presentan los resultados de este proceso de selección (Figura A1):

- Se eliminaron 207 artículos repetidos mediante el software Excel
- Se eliminaron 214 artículos después de la revisión del título.

- iii. Se eliminaron 105 artículos después de la lectura del resumen.
- iv. Se eliminaron 25 artículos después de la lectura global del documento.
- v. Se eliminaron 26 artículos después de la lectura detallada de los documentos (10 estimación de la evapotranspiración por otra metodología, 4 artículos que usaron GIS para complementar información meteorológica, 2 artículos que se sospechó de errores en las estimaciones de los indicadores).

**Figura A1**

*Proceso de selección de bibliografía.*



*Fuente: Autor*

Se realizó en total la lectura de 67 documentos , los cuales están relacionados con las temáticas de investigación de la presente investigación. Los documentos se organizaron de la siguiente manera: 43 artículos relacionados con indicadores de gestión del agua para riego, y 22 documentos relacionados con información de ecosistema de páramo (propiedades del suelo y prácticas agrícolas).

**Tabla A2.**

*Resumen de los artículos seleccionados en la revisión de literatura.*

Sitio de estudio	Coordenadas			Referencia	Indicadores empleados	CU [%]	DU [%]	WDEL [%]	Pp [mm/año]	Temp [°C]	u [m/s]	P [kPa]
	Lat	Long	Alt. [m.s.n.m]									
<b>Shiraz, Irán</b>	29°36' N	52°32' E	1810	Hamid et al, 2024	CU, DU, WDEL, AE, AELQ, PELQ, DP, WP, AD	72.7	67.3	6.6	370	27.42	2	422.3
<b>Puno, Perú</b>	14° 46' S	70° 54' W	3900	Abigael et al, 2023	CU, DU	73.66	59.27	-	-	12.65	3.46	247
<b>Kurdistan, Irán</b>	25°28' N	47°36' E	-	Faryabi et al, 2020	CU, DU, PELQ, AELQ, WDEL, DP, AD	66	50.6	11.2	340	-	-	-
<b>Lethbridge, Canada</b>	49.69° N	112.74° W	905	Yari et al, 2017	CU	92.2	-	-	297	-	-	-
<b>Beijing, China</b>	39°41' N	16°41' E	-	Cai et al, 2020	CU	77.3	-	-	620	11.3	0.29	-
<b>Sebha, Libia</b>	27°01' N	14°26' E	-	Abd El-Wahed et al, 2016	CU, DU	85.16	77	-	-	-	-	250
<b>Governorate, Egypt</b>	30° 25' N	30° 13' E	25.5	Moursy et Al, 2020	CU, DU, EA	90.43	81.07	-	-	-	2.79	-
<b>Kurdistan, Irán</b>	35° 1' N	47° 06' E	-	Maroufpoor et al 2019	CU, PELQ, WDEL, AD, AE, DP	66.29	-	20.3	-	25	2	345
<b>Juzestán, Irán</b>	30°30' N	50°17' E	-	Laserna et al, 2016	CU	80.2	-	-	350	31.9	1.62	450
<b>Zaragoza, Spain</b>	41°43' N	0°48' W	225	Cavero et al, 2016	CU, WDEL	92	-	10.07	298	14.1	2.61	-
<b>Zacatecas, México</b>	23°36' N	102°39' W	2192	Bandala et al, 2021	CU, WDEL, DU	80.65	76.69	9.56	416	14.6	3.42	-
<b>Viçosa, Brasil</b>	20°44' S	42°51' W	706	Andrade et al, 2022	CU, DU, UA, US, UH, UHSPA	85	75	-	-	-	-	320
<b>Stavropol Krai, Rusia</b>	44°47' N	44°56' E	25	Hassan et al, 2021	CU, EA, DP	81.6	-	-	-	-	-	-
<b>Lahore, Pakistan</b>	31°28' N	74°14' E	-	Iqbal et al, 2021	CU, DU, EA	83.37	76.73	-	-	-	-	155.13
<b>Viçosa, Brasil</b>	20°44' S	42°51' W	703	Ramalho et al, 2022	CU, DU, UA, US, UH, UHSPA	68.43	50.43	-	-	-	-	245.25

<b>Campinas, Brasil</b>	22° 53' S	47° 05' O	620	Flores et al, 2013	CU, DU, EA, DP	89	82	-	1425	23.3	-	300
-------------------------	-----------	-----------	-----	--------------------	----------------	----	----	---	------	------	---	-----

*\*Nota. msnm: metros sobre el nivel del mar; u: Velocidad promedio del viento; Temp: Temperatura media; Pp: Precipitación anual; P: Presión de operación del sistema de aspersión; CU: Coeficiente de uniformidad de Christiansen; DU: Coeficiente de Uniformidad de Distribución; WDEL: Pérdidas por evaporación y arrastre del viento; AELQ: Eficiencia de Aplicación en el Cuarto Inferior; DP: Pérdidas por percolación; PELQ: eficiencia potencial del cuarto inferior; AE: Eficiencia de aplicación; WP: Productividad hídrica del cultivo; AD: Riego adecuado; US: Coeficiente estadístico de uniformidad; UH: Coeficiente de uniformidad de Hart; UHSPA: Eficiencia estándar HSPA.*

**Tabla 3A.**

*Resumen de los artículos seleccionados en la revisión de literatura.*

Sitio de estudio	Coordenadas			Ref	Indicador	RIS	RWS	RRS	PP [mm/año]	ETo [mm/año]	Tmp [C]
	Lat	Long	Alt. [msnm]								
<b>Karataş, Turquía</b>	37°33' N	29°59' E	-	Abdisamad et al, 2023	RWS, RIS	0.56	0.91	-	310.7	-	11.8
<b>Awí Zone, Etiopía</b>	10°52' N	36°36' E	2411	Alemie et al, 2023	RWS, RIS	0.99	0.92	-	1700	-	17.15
<b>Riegos del Alto Aragón, España</b>	42°08' N	0°23' W	-	Andrés et al, 2013	RIS	1.21	-	-	366	1216	-
<b>Denbun Gelebd, Etiopía</b>	10°38' N	36°59' E	-	Ayele et al, 2021	RWS, RIS	1.61	1.81	-	1531.6	-	17.1
<b>Guanacaste, Costa Rica</b>	10°32' N	84°52' W	-	Benavides et al, 2021	RIS	3.13	-	-	1710	-	27.5
<b>Valdebebas, España</b>	-	-	-	Canales et al, 2019	RWS, RRS	1.78	-	0.23	435.8	-	14.59
<b>Mavoor Panchayath, India</b>	-	-	-	Madhava - Chandran et al, 2016	RWS, RIS	1.74	1.76	-	-	-	-

<b>Idanha, Portugal</b>	-	-	-	Duarte et al, 2022	RWS, RIS	0.59	0.71	-	604	1405	16.7
<b>Rbanales campus, España</b>	37°54' N	4°43' W	-	González et al, 2018	RIS	0.35	-	-	597.5	1246.8	-
<b>Douz Oasis, Túnez</b>	33.27° N	8.55° E	-	Haj -Amor et al, 2018	RWS	-	2.60	-	100	2000	-
<b>Muhanga, Ruanda</b>	02°07' S	9°45' E	1650	Hakuziman a et al, 2020	RIS, RWS	1.84	1.95	-	1200		19
<b>Khartoum, Sudan</b>	13°30' N	32°30' E	-	Al zayed et al, 2015	RIS, RWS	1.90	2.23	-	300	2514	-
<b>Borda Mau, India</b>	24°33' N	76°21' E	312	Rajput et al, 2023	RIS, RWS	1.43	1.00	-	834	876	16.85
<b>Awash, Etiopía</b>	7° 52' N	37° 56' E	-	Kedir et al, 2022	RIS	2.08	-	-	-	-	-
<b>Kalu Woreda, Etiopía</b>	10° 53' N	39° 45' E	2100	Kibret et al, 2021	RWS, RIS	0.95	1.00	-	714.5	1200	-
<b>Kerala, India</b>	11°15' N	75°57' E	-	Madhava et al, 2016	RWS, RIS	1.82	1.76	-	-	-	-
<b>Doñana, España</b>	-	-	-	Morillo et al, 2015	RIS	1.25	-	-	-	4737	-
<b>Aguas Nuevas, España</b>	38°52' N	1°57' W	-	Nascimiento et al, 2019	RIS, RWS	1.40	1.38	-	360	1300	14.1
<b>Río Yaqui, México</b>	-	-	-	Olmedo et al, 2017	RIS, RWS	1.52	1.85	-	511.8		-
<b>Cordoba, España</b>	-	-	-	Perez et al, 2013	RIS, RWS, RRS	0.60	0.80	0.4	606		17.5
<b>Valencia, España</b>	-	-	-	Puerto et al, 2021	RWS, RIS	0.54	0.66	-	614	1184	17.4
<b>Campo e Níjar, España</b>	-	-	-	Sánchez et al, 2015	RIS	1.08	-	-	300	1343.5	18
<b>Eswatini</b>	-	-	-	Shongwe et al, 2021	RIS	1.98	-	-	650	-	-

<b>The Kobo-Girana, Etiopía</b>	12° 07' N	39° 37' E	1475	Tadese et al, 2023	RWS, RIS	389.3 8	333.2 4	-	815	2095	22
<b>Sudoeste, España</b>	-	-	-	Tocados et al, 2023	RIS	0.63	-	-	590	1413	
<b>Chiro, Etiopía</b>	10° 10' N	39° 50' E	1495	Wubetu et al, 2023	RIS, RWS	1.33	1.17	-	1314	1267	21.4
<b>Sewur, Etiopía</b>	10° 3' N	39° 51' E	1288	Wubetu et al, 2024	RIS, RWS	0.90	1.00	-	1621	1289	21.4
<b>Gansu, China</b>	39°240' N	100°07' E	1383	Zhou, et al 2019	RIS, RWS	1.37	1.35	-	112	2400	7.6
<b>Upper Ganga, India</b>	29°44' N	77°50' E		Bhat et al, 2024	RIS, RWS	0.93	2.05	-	1170	-	23
<b>Cordoba, España</b>	-	-	-	Roldán et, al. 2011	RIS, RWS, RRS	0.59	0.9	0.56	-	-	-
<b>Rionegro Antioquia, Colombia</b>	6° 08' N	75° 25' W	2172			0.91	1.97	1.62	1990	1210	17.1
<b>Morales Cauca – Colombia</b>	2° 48' 34.5" N	76° 37' 15.8" W	1600	Grajales 2017	RIS, RWS, RRS	2.49	2.29	1.8	1800	1150	19
<b>Herveo Tolima – Colombia</b>	5° 02' 44.6" N	75° 12' 10.5" W	1950			1.05	3.05	2.7	2908	851	15.1

*\*Nota. msnm: metros sobre el nivel del mar; RWS: Suministro relativo de agua; RIS: Suministro relativo de riego; RRS: Suministro relativo de agua lluvia; Pp: Precipitación anual; ET<sub>o</sub> : Evapotranspiración de referencia; Tmp: Temperatura media anual.*



## **Anexo B.**

*Formato entrevista semiestructurada.*

### **Formato entrevista semiestructurada proyecto “Análisis de la gestión del agua para riego de una unidad productiva de cebolla larga (*Allium fistulosum*) bajo las condiciones agroclimáticas del páramo de Berlín (Santander – Colombia)”**

#### **Objetivo:**

Identificar las prácticas de riego de una unidad productiva típica de cebolla larga del páramo de Berlín realizadas desde la perspectiva del agricultor.

Nombre de la persona entrevistada:	
Fecha:	DD/MM/AAAA
Hora:	HH:MM

#### **Campo y cultivos**

1. ¿Cómo percibe la disponibilidad de agua de su finca?, ¿Considera que es suficiente?
2. ¿Usted percibe que la cebolla requiere de mucha agua?
3. ¿Qué considera usted que sucede con la cebolla cuando no se riega lo suficiente o se riega en exceso?
4. ¿Con base en su experiencia cuanto tiempo considera usted que demora en crecer la cebolla?
5. ¿Percibe que la falta o el exceso de agua a la cebolla afecta el crecimiento y la fecha de la cosecha?
6. ¿Percibe que la falta o el exceso de agua afecta la calidad de la cebolla?

## **Clima y suelo**

7. ¿Cómo describe usted el suelo de su finca? ¿Podría decir usted que el suelo es similar en todas partes o en algunas zonas es diferente que otras?
8. ¿Qué cambios cree usted que los diferentes tipos de suelo hace a la cebolla?
9. ¿Qué característica del suelo le informa a usted cuando debe regar o que zonas requieren de más riego que otras?
10. ¿Cuánto llueve usted decide no regar o riega un tiempo después de la lluvia?
11. ¿Percibe que la lluvia es suficiente para satisfacer la demanda de agua de la cebolla?
12. ¿En cuales meses del año considera que es necesario regar más de lo común?
13. ¿En cuales meses del año percibe que no es casi necesario regar?
14. ¿Cuál considera usted que es la condición climática que más afecta al cultivo? (Sequias o lluvias)

## **Práctica de riego**

15. ¿Puede contarme sobre su práctica de riego? ¿Cómo decide cuando regar? Y ¿Cada cuánto hacerlo?
16. ¿Usualmente cuánto tiempo dura el riego?
17. ¿Usualmente cuantos cuadros de cebolla riega por día?
18. ¿Cómo sabe cuándo fue suficiente el riego?
19. Sobre su sistema de riego, ¿Puede contarme cuales han sido los problemas que ha encontrado?
20. ¿Cuáles son los elementos del sistema de riego que comúnmente presentan más daños?

21. ¿Usualmente cuantos aspersores usa cuando realiza la labor de riego?
22. ¿Ha tenido problemas con escasez de agua o ha percibido que en algunos momentos le falta agua para regar?
23. ¿Puede contarme qué tipo de bomba usa y cuál es su fuente de alimentación?
24. ¿Usted percibe que regar la cebolla es costoso o es económico?

### **Otros**

25. ¿Cuáles cree que son los mayores retos a los que se enfrenta la cebolla larga (agua, mano de obra, costes, acceso a los recursos)?
26. ¿Ha notado cambios en la disponibilidad de agua? (caudal de la quebrada cercana, bajos niveles del lago)
27. ¿Cree que las prácticas agrícolas actuales pueden perdurar? ¿Por qué?
28. ¿En caso de necesitar más agua para regar que alternativa ha pensado para solucionar este problema?

## **Anexo C.**

### *Formato observacional en campo*

#### **Formato observacional proyecto**

Fecha:	DD/MM/AAAA
Hora:	HH:MM

El presente documento tiene por finalidad validar la información recolectada por medio de la entrevista semiestructurada, mediante la técnica de formato observacional.

#### **➤ Suelo**

- Similitudes y diferencias de las características visibles del suelo entre cuadros de cultivos:

--

- Características superficiales visibles del suelo en general:

--

- Condición superficial del suelo antes del riego:

--

- Condición superficial del suelo después del riego:

## ➤ Sistema de riego

- Fuentes de agua para el sistema de riego:

- Condiciones de las fuentes de agua para el sistema de riego

## ➤ Elementos del sistema de riego

- Diámetro de la manguera de aducción:

- Diámetro de manguera conducción (Bomba – Uniones)

- Diámetro de manguera tuberías secundarias (Uniones – aspersores)

- Longitud de las mangueras del sistema de riego

- Material de las mangueras del sistema de riego

- Condición de las mangueras, aspersores y demás accesorios del sistema de riego

- Problemas visibles del sistema de riego

## ➤ **Operación del sistema de riego**

- Número de aspersores en uso durante la actividad de riego

- Duración de la práctica de riego

- Marca y modelo de referencia del sistema de bombeo

- Modelos de los aspersores

- Diámetro de boquilla de los aspersores

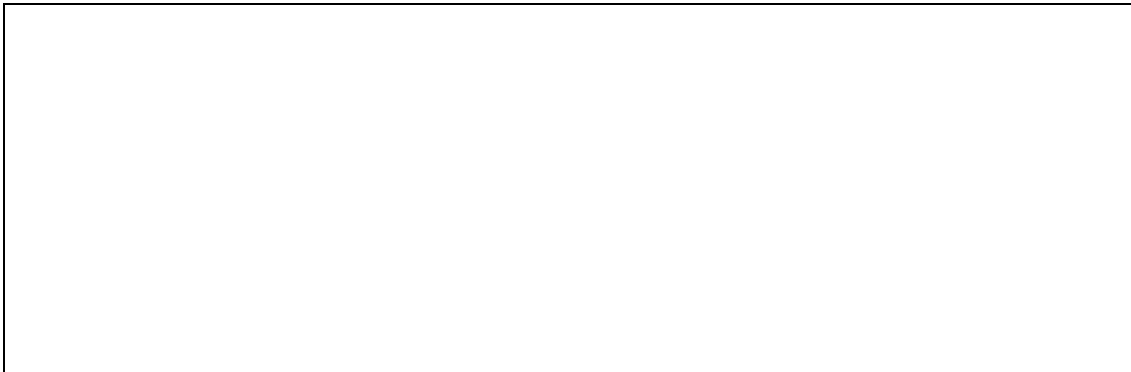
- Distancia entre aspersores



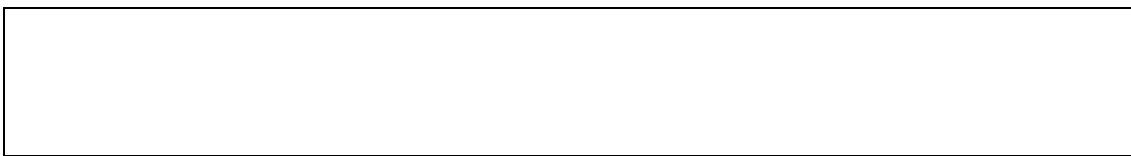
- Fuente de energía del sistema de bombeo



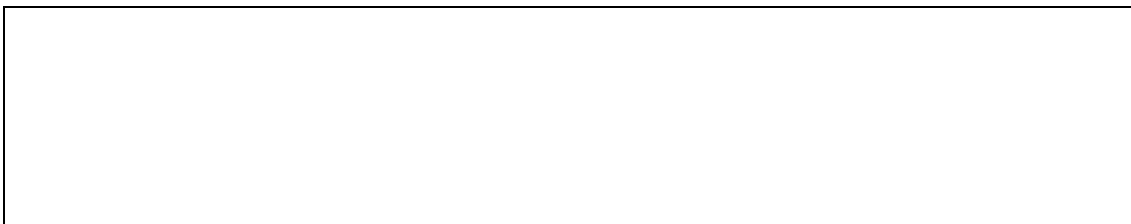
- Esquema de la distribución de los aspersores en el cultivo



- Altura de los aspersores:



- Localización de los aspersores

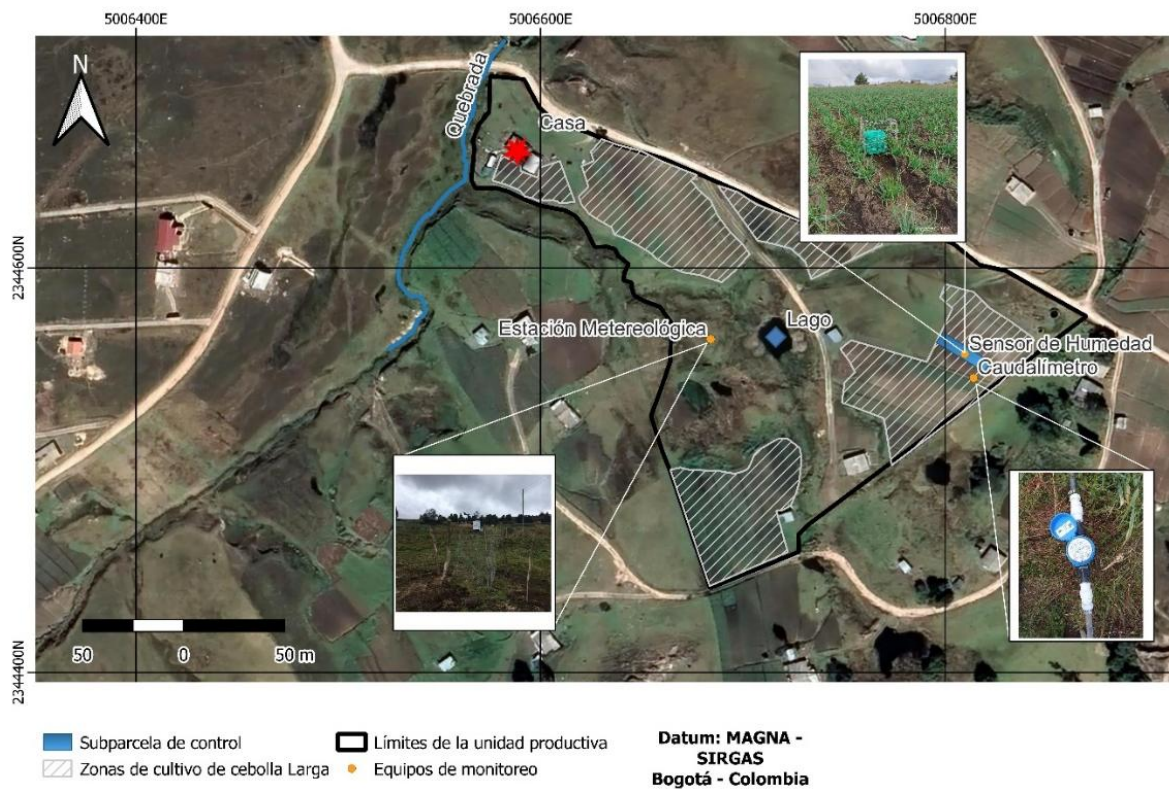




## Anexo D

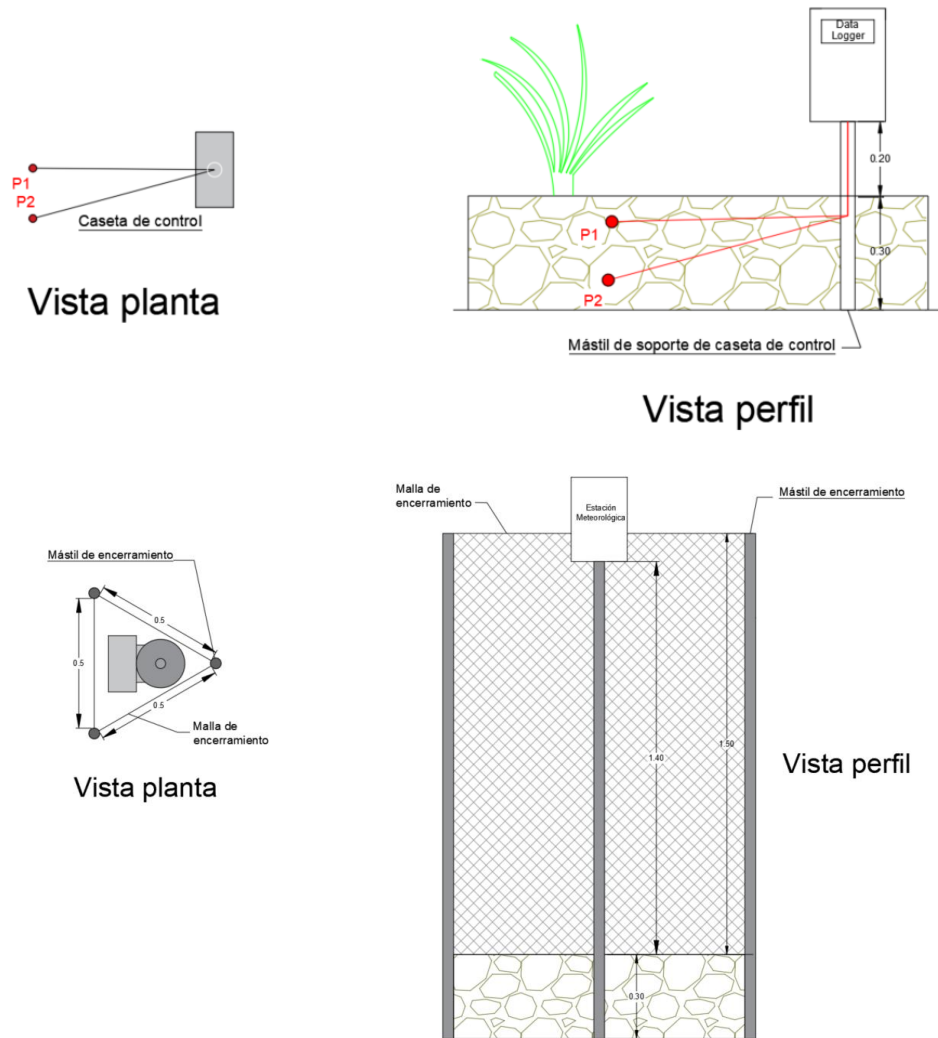
*Localización de los equipos de medición y medidas de protección.*

**Figura D1.** Localización de los equipos de medición dentro de la unidad productiva.



*Fuente: Autor*

**Figura D2.** Esquema de instalación de los equipos de monitoreo de la humedad del suelo y meteorológica.



Nota: Todas las dimensiones presentadas están dadas en metros. Las profundidades P1 y P2 se encuentra a 15 cm y 30 cm respectivamente.

Fuente: Autor.

## Anexo E

### *Proceso de calibración sensor de humedad.*

Los sensores SM150T miden de forma indirecta la humedad volumétrica del suelo ( $\theta$ ), detectando las propiedades dieléctricas del suelo húmedo como la permitividad ( $\epsilon$ ), o en este caso el índice de refracción, que equivale estrechamente a  $\sqrt{\epsilon}$ . Este proceso de medición se realiza por medio de la aplicación de energía eléctrica desde el Datalogger hasta las agujas del sensor, creando así un campo electromagnético de onda de 100 MHz. Para un tipo particular de suelo, se puede suponer que el índice de refracción es constante, por lo que el índice de refracción medido por el SM150 solo se ve afectado por cambios en el contenido de agua (Delta-T Device, 2016). De manera que esta relación se simplifica por medio de la siguiente expresión:

$$\sqrt{\epsilon} = a_0 + a_1 * \theta \quad (1)$$

$$\theta = \frac{\sqrt{\epsilon} - a_0}{a_1} \quad (2)$$

Donde los valores de  $a_0$  y  $a_1$  corresponden a las propiedades dieléctricas del suelo de estudio. En este contexto, se evidencia una correlación lineal entre el índice de refracción y la humedad del suelo. Sin embargo, la medición de la salida del sensor se expresa en voltios (V). Por ende, la ecuación proporcionada por el fabricante para calcular el índice de refracción es la siguiente:

$$\sqrt{\epsilon} = 1.0 + 14.4396V - 31.2587V^2 + 49.0575V^3 - 36.5575V^4 + 10.711V^5 \quad (3)$$

La metodología de calibración del sensor de humedad propuesta por el fabricante (Delta-T Device) se basa en una calibración puntual, en donde se realiza mediciones de

voltaje – masa una vez antes y después del secado del suelo a 105 °C, esta metodología se resume a continuación:

- i) Recolectar una muestra humedad inalterada del suelo con un volumen igual o superior a los 500 ml.
- ii) Medir el peso húmedo del suelo incluido el recipiente con una precisión de 0.1 g, posteriormente insertar el sensor de humedad SM 150T en el suelo húmedo y medir la humedad en forma de voltios .
- iii) Secar la muestra de suelo hasta que esté aún húmeda, con un contenido de agua de aproximadamente el 15%. Se puede utilizar un calentamiento suave para acelerar el proceso. Pesar de nuevo la muestra de suelo y medir nuevamente la humedad del suelo con ayuda del sensor SM 150T.
- iv) Secar completamente la muestra de suelo a 105 °C por lo menos un día, posteriormente pesar la muestra de suelo completamente seca.
- v) Calcular el índice de refracción de las dos medidas del sensor por medio de la ecuación 14.
- vi) Estimar la humedad del suelo de las dos mediciones de peso, mediante la división de la diferencia del peso húmedo en los dos instantes entre el volumen de suelo recolectado.

$$\theta = \frac{W_1 - W_{seco}}{V_{suelo}} \quad (4)$$

- vii) Estimar el valor del coeficiente  $a_1$  por medio de la división de la diferencia del cambio del índice de refracción del suelo con respecto al cambio de humedad del suelo

$$a_1 = \frac{\sqrt{\varepsilon_{humedo\ 1}} - \sqrt{\varepsilon_{humedo\ 2}}}{\theta_1 - \theta_2} \quad (5)$$

- viii) Por último, estimar el valor de  $a_0$  por medio de la ecuación 2.

El segundo enfoque, conocido como calibración continua (adaptado de Holzman et al. (2017)), implicó la recolección de datos continuos de voltaje - masa de una muestra de suelo, la cual previamente es humedecida hasta alcanzar el punto de saturación, para posteriormente dejar secar la muestra durante un período de tiempo determinado. Los datos continuos recolectados se utilizaron para establecer la relación entre el índice de refracción del suelo y su humedad, mediante el empleo de una ecuación polinómica. Tomando la experiencia investigativa de V. Gómez (2022) en suelos de páramos cercanos al área de estudio, se optó por la metodología de calibración continua para estimar la humedad del suelo de la zona de estudio. El proceso de calibración se resume a continuación:

- i) Recolección de muestras inalteradas del suelo de la zona de instalación del equipo y estratos de monitoreo en un recipiente de volumen uniforme. El volumen de estas muestras fue superior a 0.5 L, y se recolectaron usando anillos metálicos de diámetro medio de 15.8cm y, altura media de 9cm para garantizar la no interferencia de las paredes de los anillos en la respuesta del sensor (Delta-T Device, 2016).
- ii) Saturación completa de las muestras inalteradas de suelo y medición del peso saturado del suelo.
- iii) Instalación y medición de las humedades del suelo saturado mediante el sensor de humedad dos veces al día
- iv) Proceso de secado de las muestras de suelo, para este caso las muestras de suelo fueron secadas en un horno a temperatura constante a 60 °C para acelerar el proceso de secado.
- v) Mediciones del peso de las muestras de suelo y cuantificación del porcentaje de humedad dos veces al día.

- vi) Cálculo de los coeficientes de calibración mediante graficas de dispersión y regresiones polinómicas.

La relación  $(\theta, \sqrt{\varepsilon})$  ha sido descrita mediante regresiones lineales simples (Delta-T Device, 2016) como se muestra en la ecuación (23). Sin embargo, la relación  $(\theta, \sqrt{\varepsilon})$  puede ser representada de mejor manera mediante una regresión polinómica de tercer orden, como se muestra en la ecuación (17), cuando es posible obtener un conjunto de datos con humedades desde el punto de saturación hasta estar completamente deshidratado (Roth et al., 1992). Los términos  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  y  $b_3$  representan los coeficientes de calibración en una regresión polinómica de tercer orden.

$$\theta = b_0 + b_1\sqrt{\varepsilon} + b_2(\sqrt{\varepsilon})^2 + b_3(\sqrt{\varepsilon})^3 \quad (6)$$

## Anexo F

### *Formato de evaluación de la eficiencia del sistema de riego por aspersión*

**Universidad Industrial de Santander**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**Grupo de Investigación en recursos hídricos y saneamiento  
ambiental [gph]**



#### DATOS GENERALES

Propietario: \_\_\_\_\_  
Parcela: \_\_\_\_\_  
Número de campaña: \_\_\_\_\_  
Fecha: \_\_\_\_\_  
Condición climática: \_\_\_\_\_  
Localización: \_\_\_\_\_

#### DESCRIPCIÓN

Aspersor (modelo): \_\_\_\_\_  
Marco de riego: \_\_\_\_\_ [m x m]  
Área irrigada: \_\_\_\_\_ [m<sup>2</sup>]  
Diámetro de boquilla: \_\_\_\_\_ [mm]  
Presión de operación: \_\_\_\_\_ [kPa]  
Altura de aspersor: \_\_\_\_\_ [m]  
Caudal del aspersor: \_\_\_\_\_ [Lps]

#### DURACIÓN DEL RIEGO

Hora inicial: \_\_\_\_\_  
Hora final: \_\_\_\_\_  
Duración: \_\_\_\_\_ [Minutos]

#### Evaporación de los vasos recolectores

Colector No.	1	2	3
Volumen inicial [ml]	_____	_____	_____
Tiempo [Hr]	_____	_____	_____
Volumen final [ml]	_____	_____	_____
Volumen evaporado [ml]	_____	_____	_____
T. Evaporación [ml/Hr]	_____	_____	_____

Número de vasos recolectores: \_\_\_\_\_

Diámetro de los vasos recolectores: \_\_\_\_\_ [mm]

Área de los vasos recolectores: \_\_\_\_\_ [m<sup>2</sup>]

Separación de los vasos recolectores : \_\_\_\_\_ [m]

No.	Volumen captado [ml]	No	Volumen captado [ml]
1		31	
2		32	
3		33	
4		34	
5		35	
6		36	
7		37	
8		38	
9		39	
10		40	
11		41	
12		42	
13		43	
14		44	
15		45	
16		46	
17		47	
18		48	
19		49	
20		50	
21		51	
22		52	
23		53	
24		54	
25		55	
26		56	
27		57	
28		58	
29		59	
30		60	

Datos meteorológicos

Tiempo [min]	V. Viento [m/s]	D. viento [°]	Temp. [°C]	Tiempo [min]	V. Viento [m/s]	D. viento [°]	Temp. [°C]
15				135			
30				150			
45				165			
60				180			
75				195			
90				210			
105				225			
120				240			



## Anexo G

*Datos crudos de las propiedades hidrofísicas del suelo*

**Tabla G1.**

*Carbono orgánico del suelo (COS) [g/Kg]*

Punto	Profundidad [cm]	Mes de muestreo				
		1	2	3	4	5
C1	0 – 20	21.88	22.46	21.81	24.07	23.87
	20 – 40	21.31	22.85	25.97	18.09	26.16
	40 - 60	11.39	14.79	18.68	11.22	13.20
C2	0 – 20	22.00	20.01	20.69	23.71	21.60
	20 – 40	9.29	8.30	6.57	10.09	12.80
	40 – 60	7.71	5.78	4.96	5.17	8.05
C3	0 – 20	52.75	72.99	48.53	76.68	52.63
	20 – 40	52.27	52.20	46.53	67.65	48.88
	40 – 60	51.36	48.98	46.43	27.64	52.47
C4	0 – 20	50.50	52.25	49.60	69.30	51.83
	20 – 40	51.61	47.75	49.65	67.77	51.58
	40 – 60	48.48	41.79	43.33	33.00	33.71
C5	0 – 20	52.09	50.23	48.55	67.20	54.33
	20 – 40	46.78	28.87	46.67	54.11	51.01
	40 – 60	28.90	17.19	30.24	28.50	15.14
C6	0 – 20	50.33	69.00	48.94	75.86	76.68
	20 – 40	51.84	49.45	50.34	49.89	53.88
	40 - 60	18.29	39.23	23.00	21.33	40.04

**Tabla G2.***pH del suelo*

Punto	Profundidad [cm]	Mes de muestreo				
		1	2	3	4	5
C1	0 – 20	7.02	6.92	6.52	6.69	6.72
	20 – 40	6.93	6.65	6.82	7.07	6.80
	40 – 60	6.73	6.07	6.76	6.85	6.87
C2	0 – 20	6.98	6.99	6.51	6.92	6.75
	20 – 40	6.99	7.30	7.01	7.45	7.16
	40 – 60	6.43	6.67	6.30	6.66	6.65
C3	0 – 20	6.18	6.10	5.65	5.74	5.84
	20 – 40	5.58	5.99	5.57	5.67	5.68
	40 – 60	5.20	5.40	5.28	5.38	5.68
C4	0 – 20	5.85	5.72	5.76	6.02	5.82
	20 – 40	5.76	5.56	5.64	5.79	5.67
	40 – 60	5.38	5.39	5.30	5.18	5.63
C5	0 – 20	5.59	5.47	5.55	5.73	5.93
	20 – 40	5.61	5.56	5.43	5.74	5.83
	40 – 60	5.02	5.34	4.74	5.51	5.06
C6	0 – 20	5.50	5.47	5.25	5.91	5.35
	20 – 40	5.36	5.26	5.07	4.88	5.17
	40 – 60	4.81	4.81	4.75	4.47	5.04

**Tabla G3.***Conductividad Eléctrica del suelo*

Punto	Profundidad [cm]	Mes de muestreo				
		1	2	3	4	5
C1	0 – 20	230.33	175.13	177.43	186.80	178.73
	20 – 40	113.03	144.33	136.63	86.83	138.70
	40 – 60	83.03	131.93	76.13	87.67	81.80
C2	0 – 20	212.33	145.53	152.23	120.87	131.53
	20 – 40	100.53	108.17	73.50	62.93	64.63
	40 – 60	122.67	126.77	75.33	60.47	72.90
C3	0 – 20	340.90	327.33	283.00	177.87	294.67
	20 – 40	250.00	252.33	225.67	159.30	197.43
	40 – 60	214.67	215.00	184.87	120.27	266.67
C4	0 – 20	323.33	316.33	312.00	261.67	190.33
	20 – 40	270.00	262.67	150.70	201.60	130.37
	40 – 60	214.33	195.40	45.17	161.27	141.20
C5	0 – 20	304.00	297.33	252.17	258.00	234.67
	20 – 40	232.00	227.00	134.30	233.67	174.80
	40 – 60	149.20	145.80	101.43	156.47	86.27
C6	0 – 20	367.67	321.67	194.00	215.00	262.67
	20 – 40	302.33	204.73	210.00	138.47	209.33
	40 – 60	164.90	145.00	135.03	124.17	219.33

**Tabla G4.***Densidad aparente del suelo [g/cm<sup>3</sup>]*

Punto	Profundidad [cm]	Mes de muestreo				
		1	2	3	4	5
<b>C1</b>	0 – 20	1.176	1.242	1.170	1.132	1.075
	20 – 40	1.375	1.394	1.248	1.230	1.261
	40 – 60	1.363	1.579	1.362	1.315	1.467
<b>C3</b>	0 – 20	0.887	0.900	0.907	0.667	0.834
	20 – 40	0.863	0.873	0.794	0.786	0.795
	40 – 60	0.845	0.861	0.760	0.720	0.790
<b>C5</b>	0 – 20	0.666	0.734	0.797	0.734	1.117
	20 – 40	0.753	0.695	0.738	0.689	0.747
	40 – 60	0.814	0.854	0.967	0.691	0.886

**Tabla G5.***Porosidad del suelo [%]*

Punto	Profundidad [cm]	Mes de muestreo				
		1	2	3	4	5
<b>C1</b>	0 – 20	53.7%	51.0%	53.9%	55.4%	57.6%
	20 – 40	45.9%	45.1%	50.8%	51.5%	50.3%
	40 – 60	47.1%	37.8%	46.3%	48.2%	42.2%
<b>C3</b>	0 – 20	62.4%	61.8%	61.6%	73.7%	67.1%
	20 – 40	63.1%	62.7%	66.1%	69.0%	68.7%
	40 – 60	63.5%	62.9%	67.2%	71.6%	68.9%
<b>C5</b>	0 – 20	70.7%	67.7%	65.0%	71.1%	56.0%
	20 – 40	67.3%	69.8%	67.9%	72.9%	70.6%
	40 – 60	65.0%	63.2%	58.3%	72.8%	65.1%

**Tabla G6.***Humedad gravimétrica del suelo [%]*

Punto	Profundidad [cm]	Mes de muestro				
		1	2	3	4	5
C1	A	30.8%	31.9%	21.0%	26.8%	32.3%
	B	24.5%	22.7%	28.3%	23.0%	23.4%
	C	25.9%	17.4%	21.9%	19.0%	20.1%
C3	A	52.6%	48.1%	52.6%	51.2%	48.1%
	B	59.8%	50.9%	56.6%	52.5%	41.1%
	C	50.4%	35.8%	50.1%	49.5%	45.5%
C5	A	74.1%	69.2%	60.4%	61.5%	31.8%
	B	63.9%	68.9%	58.1%	61.4%	63.8%
	C	44.3%	57.6%	46.6%	56.9%	49.7%

**Tabla G7.***Densidad real del suelo [g/cm<sup>3</sup>]*

Punto	Profundidad [cm]	Mes 1
C1	0 – 20	2.54
	20 – 40	2.54
	40 – 60	2.58
C3	0 – 20	2.36
	20 – 40	2.34
	40 – 60	2.32
C5	0 – 20	2.27
	20 – 40	2.30
	40 – 60	2.32

**Tabla G8.***Porcentajes de limos, arcillas, arenas y clase textural del suelo*

<b>Punto</b>	<b>Profundidad [cm]</b>	<b>% Arenas</b>	<b>% Limos</b>	<b>% Arcillas</b>	<b>Clasificación</b>
<b>C1</b>	0 - 20	57.14	14.23	28.63	Franco arcillo arenoso
	20 - 40	55.85	14.24	29.91	Franco arcillo arenoso
	40 - 60	53.33	12.99	33.68	Franco arcillo arenoso
<b>C2</b>	0 - 20	57.82	13.07	29.12	Franco arcillo arenoso
	20 - 40	57.88	11.79	30.32	Franco arcillo arenoso
	40 - 60	47.88	14.30	37.83	Arcillo arenoso
<b>C3</b>	0 - 20	16.76	55.49	27.75	Franco arcillo limoso
	20 - 40	13.62	39.78	46.60	Arcilloso
	40 - 60	14.16	46.15	39.69	Franco arcilloso limoso
<b>C4</b>	0 - 20	33.06	27.42	39.53	Franco arcilloso
	20 - 40	24.69	32.34	42.97	Arcilloso
	40 - 60	30.75	38.37	30.88	Franco arcilloso
<b>C5</b>	0 - 20	15.62	52.30	32.08	Franco arcillo limoso
	20 - 40	17.38	59.68	22.94	Franco limoso
	40 - 60	26.73	37.07	36.21	Franco arcilloso
<b>C6</b>	0 - 20	12.02	51.74	36.24	Franco arcillo limoso
	20 - 40	9.67	39.86	50.47	Arcilloso
	40 - 60	22.50	25.67	51.83	Arcilloso
<b>Promedio</b>		31.49	32.58	35.93	Franco arcilloso

**Tabla G9.**

*Promedio de las propiedades evaluadas de estudio por profundidad de muestreo para la zona “Alta”*

<b>Propiedad</b>	<b>Profundidad [cm]</b>			<b>Valor p</b>
	<b>0-20</b>	<b>20-40</b>	<b>40-60</b>	
<b>Da [g/cm<sup>3</sup>]</b>	1.16 <sup>a</sup>	1.30 <sup>b</sup>	1.42 <sup>b</sup>	< 0.05
<b>Hm [%]</b>	28.56 <sup>a</sup>	24.38 <sup>ab</sup>	20.85 <sup>b</sup>	< 0.05
<b>Pr [%]</b>	54.32 <sup>a</sup>	48.71 <sup>b</sup>	44.32 <sup>b</sup>	< 0.01
<b>pH</b>	6.80 <sup>a</sup>	7.02 <sup>b</sup>	6.60 <sup>a</sup>	< 0.01
<b>C.E [μS/cm]</b>	171.09 <sup>a</sup>	102.93 <sup>b</sup>	91.87 <sup>c</sup>	< 0.01
<b>COS [g/kg]</b>	22.20 <sup>a</sup>	16.14 <sup>ab</sup>	10.09 <sup>b</sup>	< 0.01

Nota: Medias que no comparten la misma letra son significativamente diferentes ( $\alpha = 0.05$ )

**Tabla G10.**

*Promedio de las propiedades evaluadas de estudio por profundidad de muestreo para la zona “Media – Baja”*

<b>Propiedad</b>	<b>Profundidad [cm]</b>			<b>Valor p</b>
	<b>0-20</b>	<b>20-40</b>	<b>40-60</b>	
<b>Da [g/cm<sup>3</sup>]</b>	0.82 <sup>a</sup>	0.77 <sup>a</sup>	0.82 <sup>a</sup>	0.5
<b>Hm [%]</b>	54.96 <sup>ab</sup>	57.71 <sup>a</sup>	48.63 <sup>b</sup>	0.034
<b>Pr [%]</b>	65.71 <sup>a</sup>	67.80 <sup>a</sup>	65.85 <sup>a</sup>	0.49
<b>pH</b>	5.76 <sup>a</sup>	5.64 <sup>a</sup>	5.31 <sup>b</sup>	< 0.01
<b>C.E [μS/cm]</b>	276.73 <sup>a</sup>	208.33 <sup>b</sup>	159.32 <sup>c</sup>	< 0.01
<b>COS [g/kg]</b>	58.51 <sup>a</sup>	50.94 <sup>b</sup>	34.45 <sup>c</sup>	< 0.01

Nota: Medias que no comparten la misma letra son significativamente diferentes ( $\alpha = 0.05$ )

**Tabla G11.**

*Valores promedio mensuales de las variables evaluadas de estudio de la zona “Alta” de la subparcela y precipitación y lámina de riego acumulada entre muestreos de suelo.*

Propiedad	Prof [cm]	Mes						CV	p - value
		1	2	3	4	5	Prom		
Da [g/cm <sup>3</sup> ]	0-20	1.18	1.24	1.17	1.13	1.08	1.16	0.05	0.41
	20-40	1.37	1.39	1.25	1.23	1.26	1.3	0.05	0.41
	40-60	1.36	1.58	1.36	1.32	1.47	1.42	0.07	0.41
Humedad [%]	0-20	30.82	31.93	20.98	26.76	32.32	28.56	0.15	0.41
	20-40	24.53	22.7	28.34	22.95	23.38	24.38	0.09	0.41
	40-60	25.88	17.45	21.87	18.96	20.08	20.85	0.14	0.41
Porosidad [%]	0-20	53.67	51.03	53.87	55.4	57.62	54.32	0.04	0.41
	20-40	45.87	45.07	50.83	51.51	50.3	48.71	0.06	0.41
	40-60	47.12	37.75	46.34	48.16	42.2	44.32	0.09	0.41
pH	0-20	7.00	6.95	6.51	6.79	6.73	6.80	0.03	0.13
	20-40	6.96	6.86	6.90	7.22	6.95	7.02	0.02	0.41
	40-60	6.55	6.27	6.47	6.72	6.75	6.60	0.02	0.46
C.E	0-20	221.33	160.33	164.83	153.83	155.13	171.09	0.15	0.35
	20-40	106.78	126.25	105.07	74.88	101.67	102.93	0.16	0.17
	40-60	102.85	129.35	75.73	74.07	77.35	91.87	0.23	0.27
COS [g/kg]	0-20	21.88	21.24	21.25	23.89	22.74	22.20	0.05	0.20
	20-40	15.30	15.58	16.27	14.09	19.48	16.14	0.11	0.41
	40-60	9.55	10.28	11.82	8.19	10.62	10.09	0.12	0.59
Precipitación [mm]*	-	138.2	216.1	43.4	56.6	3.7	113.6	0.61	-
Riego [mm]*	-	0	180	114.4	22.78	85.77	79.3	0.91	-

Nota: la precipitación y el riego de esta tabla corresponde a la lámina de agua aplicada al suelo entre las fechas de muestreo del suelo.



**Tabla G12.**

*Valores promedio mensuales de las variables evaluadas de estudio de la zona “Media – Baja” de la subparcela y precipitación y lámina de riego acumulada entre muestreos de suelo.*

Propiedad	Prof [cm]	Mes						CV	p – value
		1	2	3	4	5	Prom		
Da [g/cm3]	0 – 20	0.78	0.82	0.85	0.70	0.98	0.83	0.11	0.38
	20 – 40	0.80	0.78	0.77	0.74	0.77	0.77	0.03	0.23
	40 – 60	0.83	0.86	0.86	0.71	0.84	0.82	0.07	0.35
Humedad [%]	0 – 20	63.40	58.70	56.48	56.38	39.94	54.98	0.14	0.27
	20 – 40	61.89	59.91	57.35	56.96	52.40	57.70	0.06	0.52
	40 – 60	47.31	46.70	48.34	53.19	47.64	48.64	0.05	0.98
Porosidad [%]	0 – 20	66.57	64.78	63.26	72.39	61.55	65.71	0.06	0.23
	20 – 40	65.20	66.24	67.00	70.94	69.62	67.80	0.03	0.15
	40 – 60	64.25	63.04	62.78	72.19	66.97	65.85	0.05	0.15
pH	0 – 20	5.71	5.63	5.51	5.92	5.67	5.76	0.03	0.10
	20 – 40	5.55	5.52	5.37	5.84	5.51	5.64	0.04	0.29
	40 – 60	5.05	5.15	4.94	5.46	5.26	5.31	0.05	0.08
C.E	0 – 20	333.98 <sup>a</sup>	315.67 <sup>ab</sup>	260.29 <sup>b</sup>	228.13 <sup>b</sup>	245.58 <sup>b</sup>	276.73	0.15	0.01
	20 – 40	263.58	236.68	180.17	183.26	177.98	208.33	0.17	0.17
	40 – 60	185.78	175.30	116.62	140.56	178.37	159.33	0.17	0.29
COS [g/kg]	0 – 20	51.42 <sup>a</sup>	61.12 <sup>ac</sup>	48.90 <sup>b</sup>	72.26 <sup>c</sup>	58.87 <sup>ac</sup>	58.51	0.14	0.02
	20 – 40	50.62	44.57	48.30	59.86	51.34	50.94	0.10	0.06
	40 – 60	36.76	36.80	35.75	27.62	35.34	34.45	0.10	0.49
Precipitación [mm]*	-	138.2	216.1	43.4	56.6	3.7	113.6	0.61	-
Riego [mm]*	-	0	180	114.4	22.78	85.77	79.3	0.91	-

Nota: la precipitación y el riego de esta tabla corresponde a la lámina de agua aplicada al suelo entre las fechas de muestreo del suelo.

Medias que no compartan la misma letra son significativamente diferentes ( $\alpha = 0.05$ )

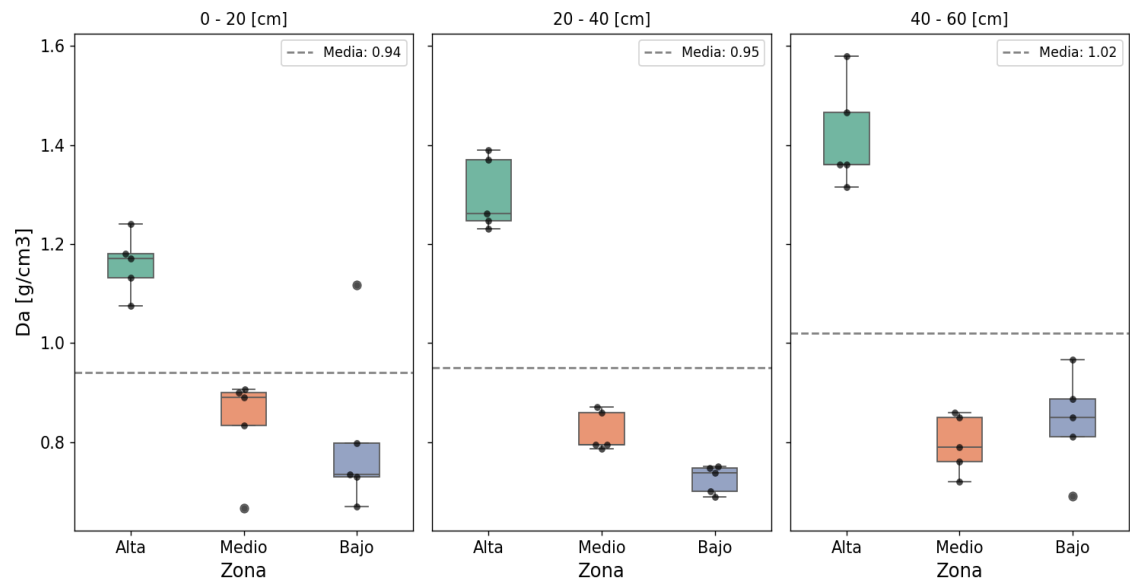
**Anexo H.**

*Representaciones gráficas de las variaciones de las propiedades durante el periodo de estudio.*

*i) Variaciones a razón de la zona y profundidad*

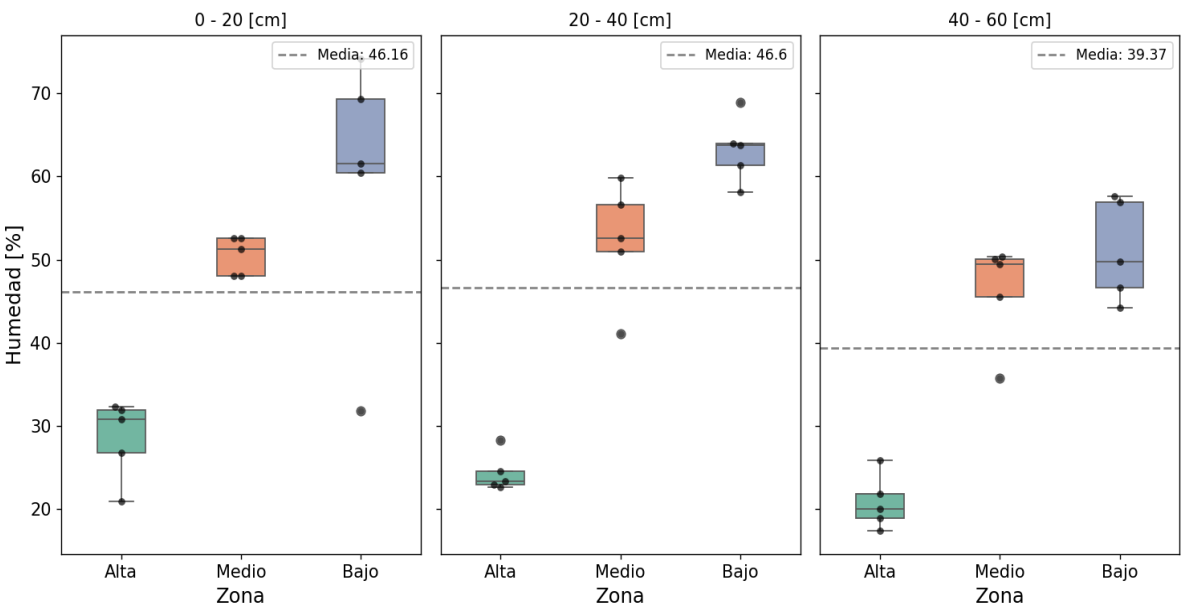
**Figura H1**

*Densidad aparente del suelo por zona y por profundidad.*



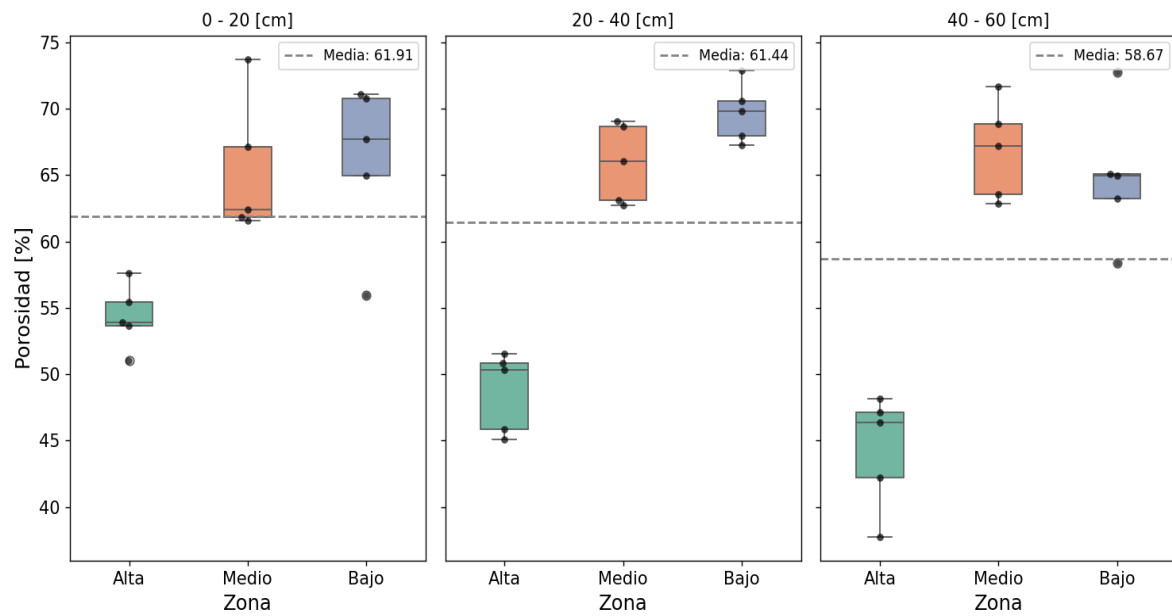
**Figura H2**

*Humedad del suelo por zona y por profundidad*



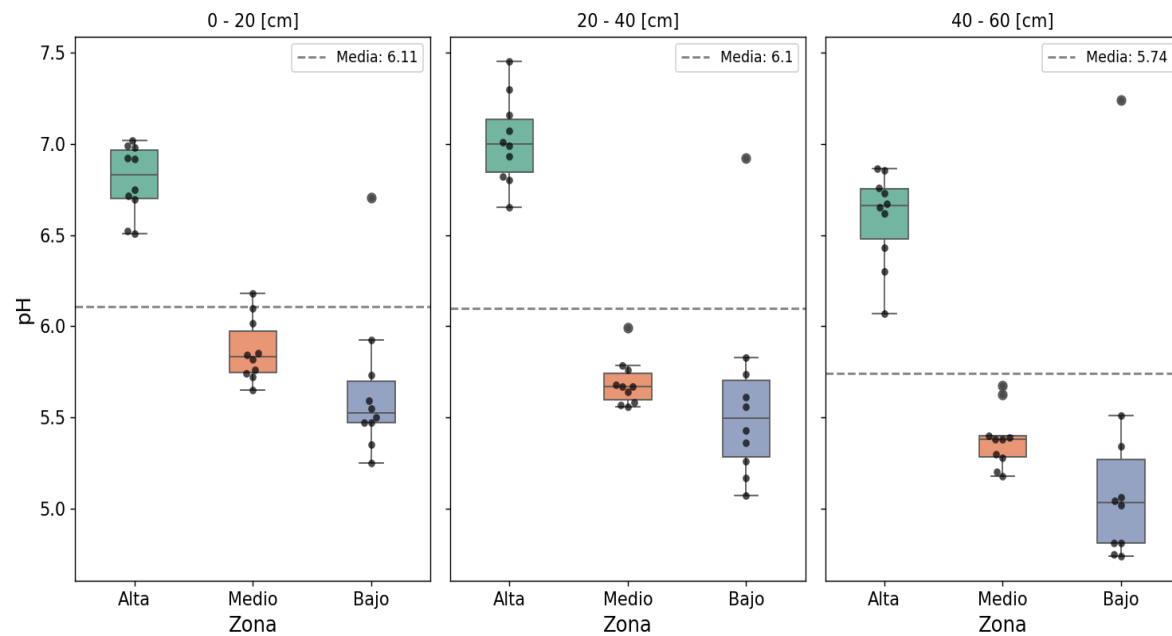
**Figura H3**

Porosidad del suelo por zona y por profundidad



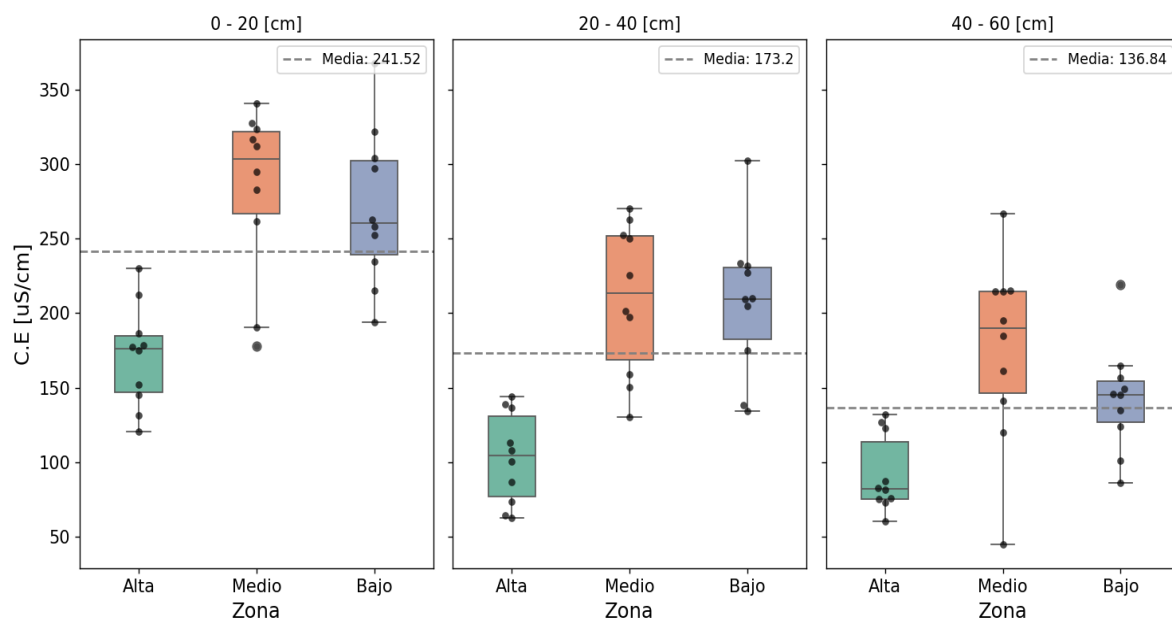
**Figura H4**

pH del suelo por zona y por profundidad



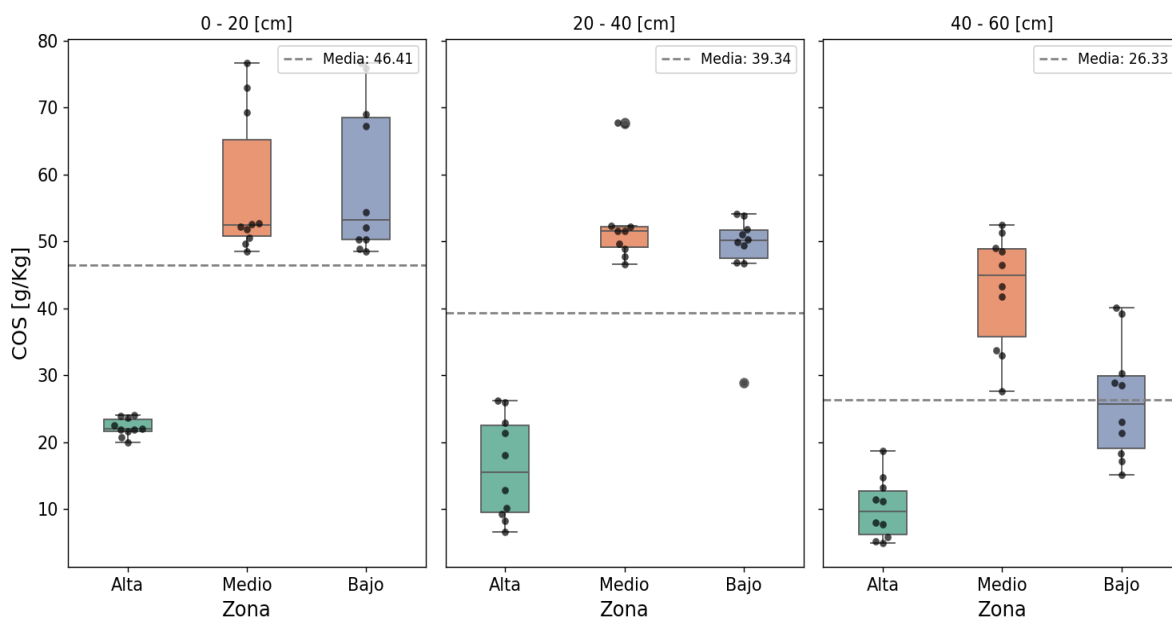
**Figura H5**

Conductividad eléctrica del suelo por zona y por profundidad



**Figura H6**

Carbono orgánico del suelo por zona y por profundidad



## **Anexo I**

### **Resultados calibraciones contenido de humedad- índice de refracción**

#### **i. Fotografías antes y después del secado en calibraciones puntuales**

**Prof\_15, Saturado**



**Prof\_30, Saturado**











**Prof\_15, Seco a 105 °C**











**Prof\_30, Seco a 105 °C**







ii. *Fotografías durante la calibración continua*

No	Profundidad 1 [15 cm]	Profundidad 2 [30 cm]
1		
2		
3		
4		



5		
6		
7		
8		

9	 <p>A digital scale with a stainless steel weighing pan and a blue base. The display shows 26190g. A sample of dark soil in a metal container sits on the pan. A small white label is attached to the container. The scale is on a white tiled floor. A timestamp '07/18/2024 08:18' is visible in the bottom right corner of the image.</p>
10	 <p>A digital scale with a stainless steel weighing pan and a blue base. The display shows 26111g. A sample of dark soil in a metal container sits on the pan. A small white label is attached to the container. The scale is on a white tiled floor. A timestamp '07/18/2024 11:41' is visible in the bottom right corner of the image.</p>
	 <p>A digital scale with a stainless steel weighing pan and a blue base. The display shows 25403g. A sample of dark soil in a metal container sits on the pan. A small white label is attached to the container. The scale is on a white tiled floor. A timestamp '07/18/2024 09:18' is visible in the bottom right corner of the image.</p>
	 <p>A digital scale with a stainless steel weighing pan and a blue base. The display shows 25322g. A sample of dark soil in a metal container sits on the pan. A small white label is attached to the container. The scale is on a white tiled floor. A timestamp '07/18/2024 11:41' is visible in the bottom right corner of the image.</p>



iii. *Resultados de la calibración puntual*

<i>Muestra</i>	$W_t$ [g]	$W_s$ [g]	$W_w$ [g]	$V_w$ [mV]	$V_o$ [mV]	$Da$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$W$ [g/g]	$\theta_w$ [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	$\sqrt{Ew}$	$\sqrt{Eo}$	$a_1$	$a_0$
<b>Prof_1 [15 cm]</b>	3517.40	2472.80	1044.60	857.72	16.90	0.79	0.75	0.59	6.53	1.24	9.02	1.24
<b>Prof_2 [30 cm]</b>	3347.20	2393.30	953.90	838.95	17.70	0.73	0.73	0.54	6.42	1.25	9.65	1.25

*Nota:*  $W_t$ : Peso de la muestra saturada;  $W_s$ : Peso de la muestra seca a 105 °C;  $W_w$ : Contenido de agua dentro de la muestra;  $V_o$ : Voltaje de salida muestra seca;  $V_w$ : Voltaje de salida muestra húmeda;  $Da$ : Densidad aparente de la muestra;  $W$ : Contenido gravimétrico de humedad;  $\theta_w$  contenido de agua;  $\sqrt{Ew}$ : índice de refracción de la muestra húmeda;  $\sqrt{Eo}$ : índice de refracción en de la muestra seca.  $a_0$  y  $a_1$ : Propiedades dieléctricas del suelo de estudio.

ii) *Resultados de la calibración continua*

<i>No.</i>	<i>Fecha de Medición</i>	$W_{T1}$ [g]	$W_{T2}$ [g]	$W_{W1}$ [g]	$W_{W2}$ [g]	$W_1$ [g/g]	$W_2$ [g/g]	$\theta_{w1}$ [%]	$\theta_{w2}$ [%]	"Vo 1" [mV]	"Vo 2" [mV]	$\sqrt{Ew 1}$	$\sqrt{Ew 2}$
<b>1</b>	10/07/2024	3517.6	3347.2	1044.8	953.9	42%	40%	33.2%	29.2%	857.721	838.948	6.53	6.42
<b>2</b>	10/07/2024	3485.9	3323.6	1013.1	930.3	41%	39%	32.2%	28.5%	725.234	728.672	5.78	5.80
<b>3</b>	11/07/2024	3333.3	3185.6	860.5	792.3	35%	33%	27.3%	24.2%	706.202	654.981	5.67	5.40
<b>4</b>	11/07/2024	3319.3	3170.5	846.5	777.2	34%	32%	26.9%	23.8%	620.355	580.201	5.21	5.00
<b>5</b>	12/07/2024	3251.4	3108.5	778.6	715.2	31%	30%	24.7%	21.9%	577.61	429.639	4.98	4.24
<b>6</b>	12/07/2024	3236.1	3092.5	763.3	699.2	31%	29%	24.3%	21.4%	552.038	406.251	4.85	4.12
<b>7</b>	17/07/2024	2737.7	2650	264.9	256.7	11%	11%	8.4%	7.9%	116.709	124.25	2.33	2.40
<b>8</b>	17/07/2024	2723	2637.4	250.2	244.1	10%	10%	8.0%	7.5%	79.29	92.15	1.97	2.10
<b>9</b>	18/07/2024	2619.1	2540.3	146.3	147	6%	6%	4.6%	4.5%	65.203	67.746	1.82	1.85
<b>10</b>	18/07/2024	2611.1	2532.2	138.3	138.9	6%	6%	4.4%	4.2%	48.856	72	1.64	1.89
<b>11</b>	22/07/2024	2472.8	2393.3	0	0	0%	0%	0.0%	0.0%	16.87	17.702	1.23	1.25

*Nota:*  $W_t$ : Peso de la muestra saturada;  $W_w$ : Contenido de agua dentro de la muestra;  $V_o$ : Voltaje de salida muestra;  $W$ : Contenido gravimétrico de humedad;  $\theta_w$  contenido de agua;  $\sqrt{Ew}$ : índice de refracción de la muestra.

## **Anexo J**

### *Calibración sensor de humedad del suelo SM 150T*

Los sensores de humedad del suelo utilizan la permitividad dieléctrica, una propiedad física del suelo que permite la medición de la polarización y conducción de la carga eléctrica del agua en el suelo (Delta-T Device, 2016). Sin embargo, las alteraciones en el suelo, derivadas de las variaciones en las propiedades físicas del suelo, dificultan la precisión de estos sensores, lo que requiere procesos de calibración específicos para cada suelo (Mane et al., 2024). Para el proceso de calibración puntual, entre los resultados obtenidos para los índices de refracción, para el coeficiente  $a_0$  en ambos estratos fueron similares a los presentados por el fabricante delta para suelos orgánicos ( $a_0 = 1.3$ ), sin embargo, para el coeficiente  $a_1$ , los valores fueron superiores ( $a_1 = 7.7$ ) para ambos estratos. La Tabla 23 presentan los coeficientes  $a_0$  y  $a_1$  para los dos estratos.

**Tabla J1.**

*Coefficientes lineales de calibración de los sensores de humedad del suelo.*

<b>Sensor</b>	<b><math>a_0</math></b>	<b><math>a_1</math></b>	<b><math>R^2</math></b>
Prof_1 [15 cm]	1.24	9.02	0.99
Prof_2 [30 cm]	1.25	9.65	0.99

Nota: los coeficientes  $a_0$  y  $a_1$  corresponde a los coeficientes de una ecuación lineal.

Con base a la caracterización hidrofísica del suelo en la zona “*Media – Baja*” (ver Tabla 17), la conductividad eléctrica desciende a razón de la profundidad, en donde para el estrato de 0 – 20 cm se registró un promedio calculado de conductividad eléctrica de mayor valor (276.730  $\mu\text{S/cm}$ ) en comparación con el promedio calculado del estrato de 20 – 40 (208.33  $\mu\text{S/cm}$ ). La diferencia entre los valores de conductividad eléctrica mencionados

anteriormente explica la razón de que el coeficiente  $a_0$  sea ligeramente superior en el segundo estrato con respecto al primero, debido a que el sensor emite una respuesta de voltaje superior en suelos con poca salinidad respecto a un suelo moderadamente salino (Delta-T Device, 2016). Por otro lado, con respecto al coeficiente  $a_1$ , este se relaciona (aproximadamente) con el índice de refracción del agua que usualmente su valor es alrededor de 8.0 típicamente toma un valor de 8 (Delta-T Device, 2016), valores superiores a 8.0 en el coeficiente  $a_1$  estarían relacionados con el agua intersticial del suelo, lo cual está relacionado con un mayor contenido de materia orgánica, porosidad y menor densidad aparente (V. Gómez, 2022).

La calibración puntual es altamente efectiva para calibrar sensores en zonas específicas (es decir, para la medición fija y continua de la humedad del suelo), logrando una precisión media de  $\pm 0.012 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Sin embargo, la calibración generalizada, usualmente desarrollada para estudios de campo a gran escala, ha demostrado tener una menor precisión, con una media de  $\pm 0.048 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Una posible explicación de la reducción en la precisión en la calibración generalizada es la inclusión de diversas clases texturales de suelo y condiciones de campo en grandes extensiones de terreno, lo que introduce posibles relaciones no lineales que no pueden ser adecuadamente consideradas mediante regresión lineal (Mane et al., 2024). De manera que, la calibración lineal puede no ser el método más adecuado para calibrar sensores de humedad, particularmente bajo el contexto de estudios de campo a gran escala.

Los resultados de la calibración continua, también denominada por otros autores como calibración no lineal, se obtuvieron mediante la medición de la humedad del suelo por medio de gravimetría y el sensor de humedad, dos veces al día durante cinco días. Durante el proceso de secado de la muestra de suelo, se aumentó gradualmente la temperatura del horno desde los 40 hasta los 70 grados Celsius, y finalmente, se secó la muestra durante dos

días a 105 grados Celsius para asegurar un secado completo. En la Tabla 24 y la Figura 25 se presentan los coeficientes polinómicos de tercer orden y los puntos de medición, respectivamente.

**Tabla J2.**

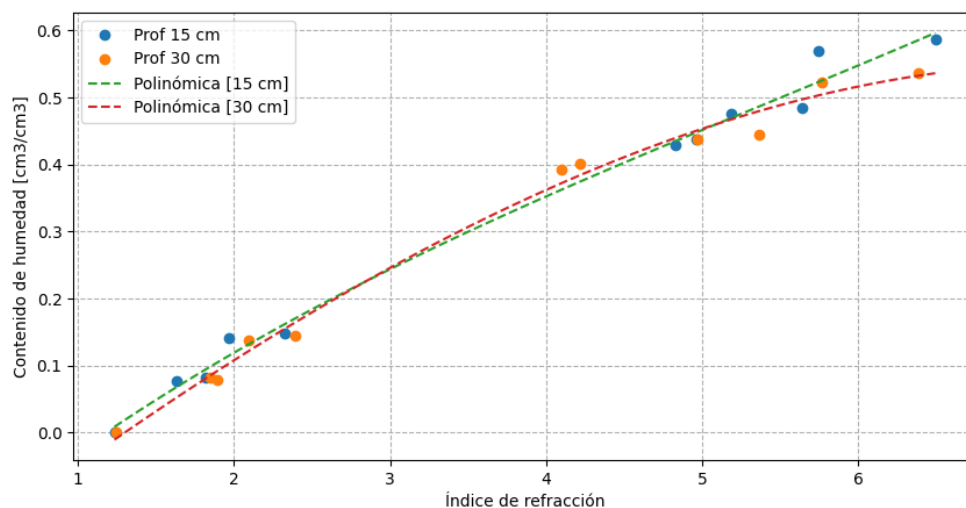
*Coeficientes polinómicos de calibración de los sensores de humedad*

<i>Sensor</i>	<i>b<sub>0</sub></i>	<i>b<sub>1</sub></i>	<i>b<sub>2</sub></i>	<i>b<sub>3</sub></i>	<i>R<sup>2</sup></i>
Prof_1 [15 cm]	-0.2050	0.1936	-0.018	0.0011	0.99
Prof_2 [30 cm]	-0.2208	0.1787	-0.0061	-0.0005	0.99

Nota: los coeficientes  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  y  $b_3$  corresponde a los coeficientes de una ecuación polinómica de tercer orden.

**Figura J1.**

*Regresión polinómica de tercer orden para la calibración de los sensores de humedad*

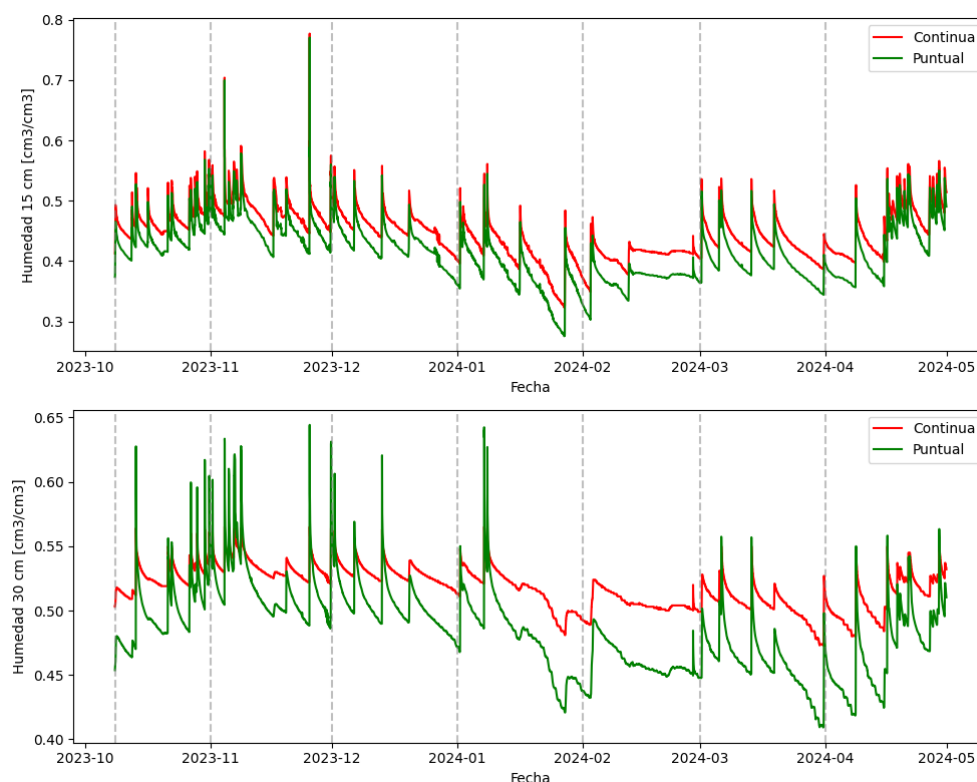


Al comparar los dos métodos de calibración (ver Figura 25), se observa que ambas ecuaciones (lineal y polinómica de tercer grado) presentan tendencias similares con respecto a la entrada de agua al suelo (precipitación y/o riego). Sin embargo, la ecuación lineal

sobreestima los descensos de la humedad del suelo en comparación con la ecuación polinómica. Esto podría deberse a que la ecuación lineal solo considera dos puntos para la calibración (saturado y completamente seco), mientras que la ecuación polinómica considera múltiples puntos durante el proceso gradual de secado del suelo. Además, describir con precisión la compleja relación entre la respuesta dieléctrica del suelo y el contenido de humedad del suelo empleando únicamente un método de regresión lineal puede generar que se ignoren otros fenómenos como, por ejemplo, el tipo de suelo, la salinidad y la temperatura, factores que afectan las propiedades dieléctricas del suelo (Mane et al., 2024). De manera que, para superar este desafío, se recomienda el uso de modelos no lineales para calibrar esta relación.

## Figura J2.

*Seguimiento de la humedad del suelo bajos los métodos de calibración puntual y continua.*



## **Anexo K.**

### *Validez de los datos meteorológicos*

La estación meteorológica empleada (WatchDog series 2000T) almacena sus datos de manera automática dentro de una memoria interna del equipo, por lo tanto, no se presentaron problemas de digitalización de los datos. La validez de los datos meteorológicos recolectados por la estación meteorológica de estudio durante el periodo de monitoreo se contrastó con la información meteorológica de dos estaciones cercanas, específicamente la estación “*GPH-UIS*” (7°06'17.0"N 72°56'42.9"W) y la estación IDEAM “*Berlin*” (7°11'12.7"N 72°52'06.4"W). Para el caso de la estación IDEAM “*Picacho*” (7°06'36.0"N 72°57'59.5"W), se usó solamente para la comparación de datos pluviométricos, pero solo hasta la fecha del 30 de marzo del 2024

La comparación meteorológica de las estaciones se realizó entre el 1 de octubre de 2023 y el 30 de abril de 2024, como se muestra en las series de tiempo de las Figuras J1 y J2. Esta comparación fue posible gracias a la fisiografía homogénea de la zona, por lo tanto, no se esperan fuertes variaciones en el movimiento de las masas de aire (FAO, 2006). No obstante, algunas limitaciones en la comparación con las estaciones fueron las siguientes:

i) La estación Berlín se encuentra en una planicie mucho más urbanizada que la zona de estudio y presenta una diferencia altitudinal de 164 m, además de una distancia horizontal de aproximadamente 10.9 km entre ambas estaciones.

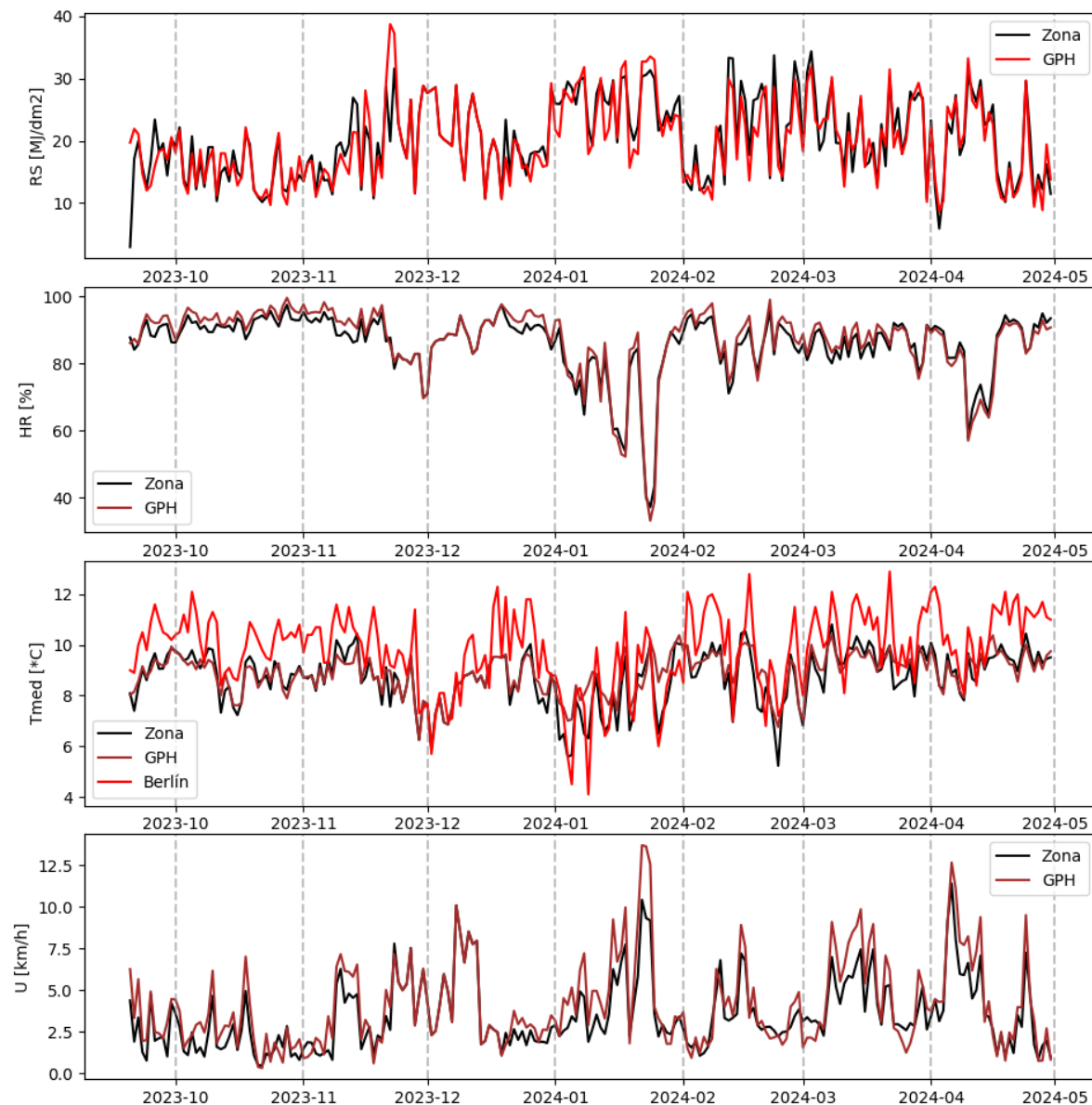
ii) La estación GPH – UIS está situada en una posición más elevada que la estación de estudio (92 m), pero es más cercana con una distancia horizontal de 1.64 km. Entre ambas estaciones hay una barrera natural de plantación de pinos, lo que puede generar variaciones en las velocidades del viento.

- iii) La estación Picacho se localiza al costado contrario de la montaña, a una distancia horizontal de 3.13 km y una diferencia vertical de 42 m, drenando a una cuenca hidrográfica adyacente.

En la Figura J1 se observa la series de tiempo de las variables meteorológicas de estudio para las estaciones cercanas a la zona de estudio,

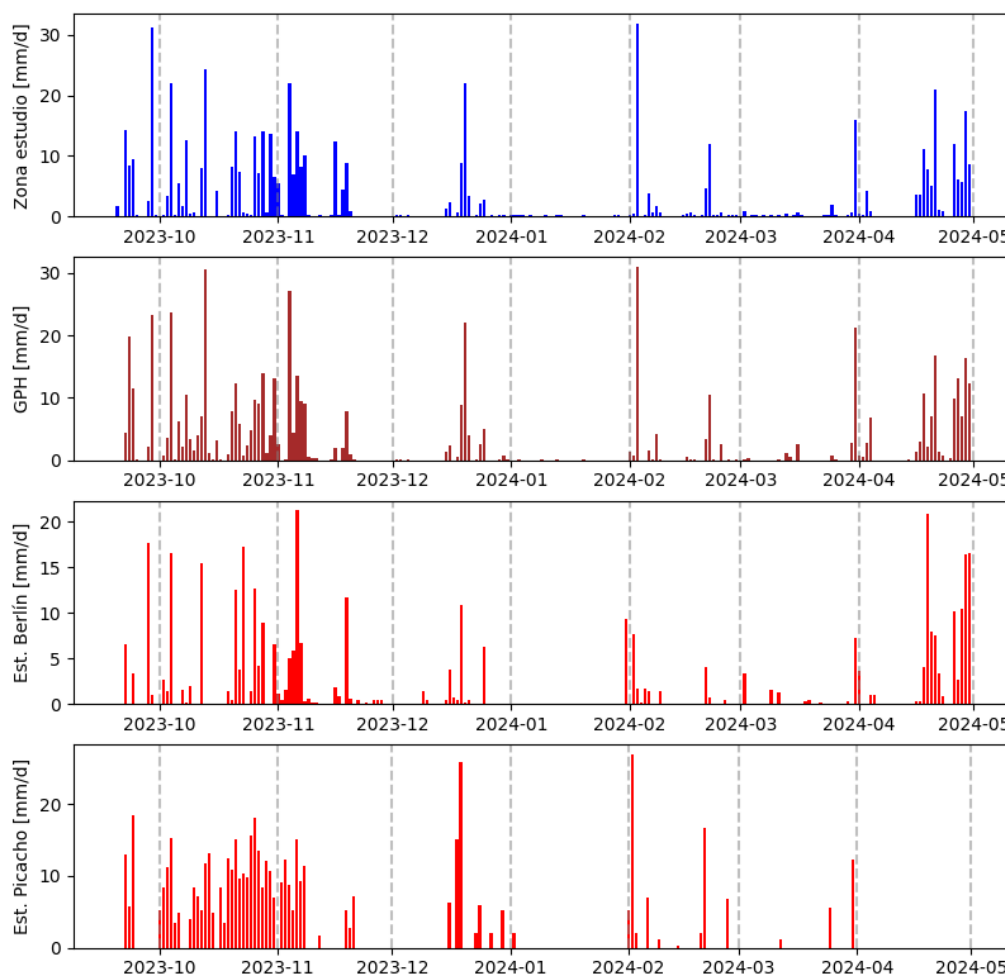
**Figura K1.**

*Series de tiempo de las variables meteorológicas de estudio, GPH – UIS y Berlín.*



**Figura K2.**

*Series de tiempo de la precipitación zona de estudio, GPH – UIS, Berlín y Picacho*

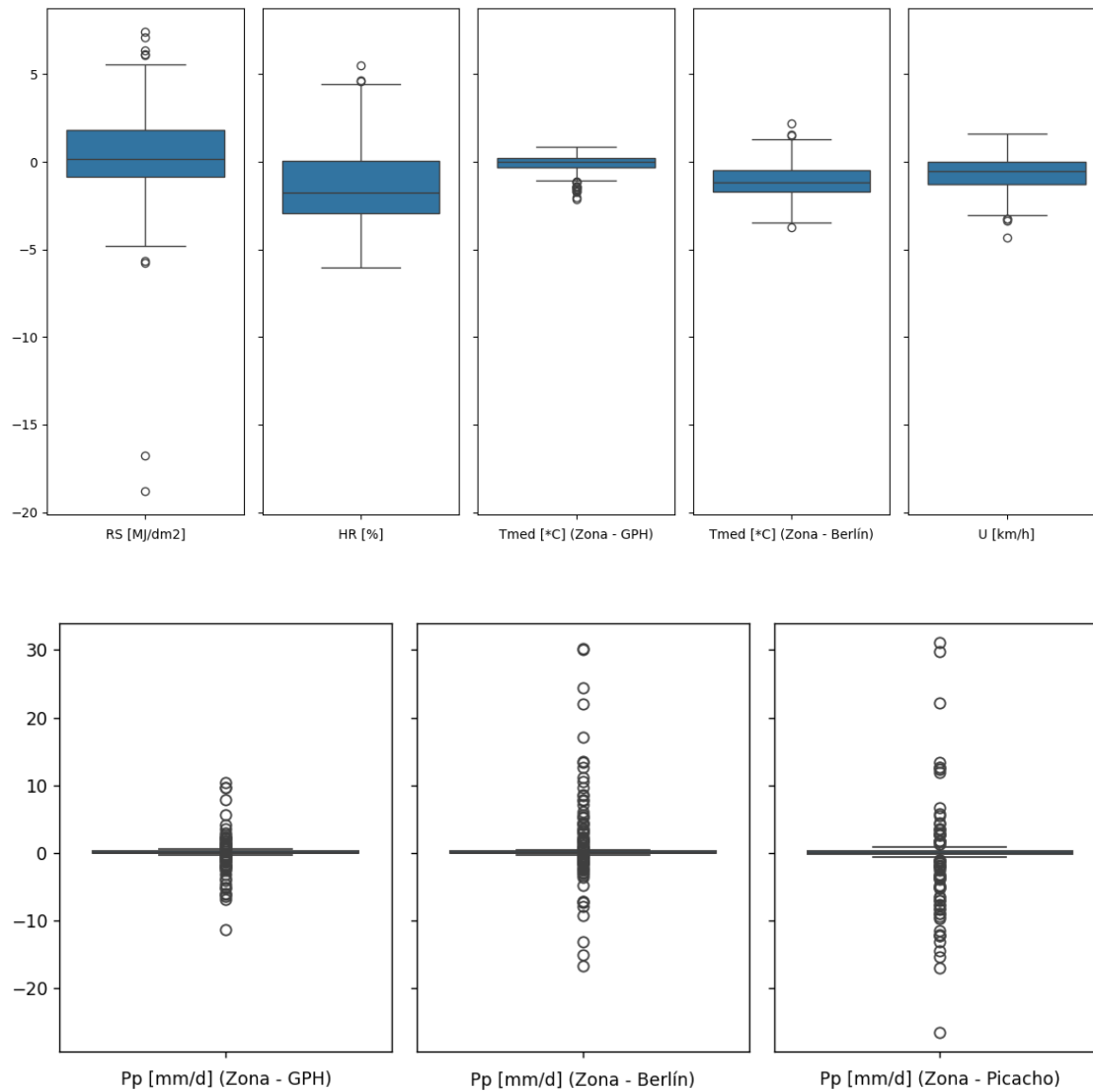


En la Figura J3 se presentan los rangos intercuartiles entre los que se encuentran las diferencias entre los datos monitoreados por estación de la zona de estudio respecto a sus valores referencia del IDEAM y GPH-UIS. La diferencia media entre las observaciones fue de: 0.406 MJ/m<sup>2</sup>d de radiación solar, -1.22% de humedad relativa, -0.15 °C de temperatura con la estación GPH-UIS, -1.10 °C de temperatura con la estación IDEAM Berlín , -0.65 m/s de velocidad del viento, -0.03 mm/d lluvia con GPH-UIS, 0.89 mm/d lluvia en Berlín y -0.43 mm/d lluvia en Picacho.



**Figura K3.**

*Diferencias entre los datos diarios de las estaciones IDEAM y GPH UIS con la estación de la zona de estudio*

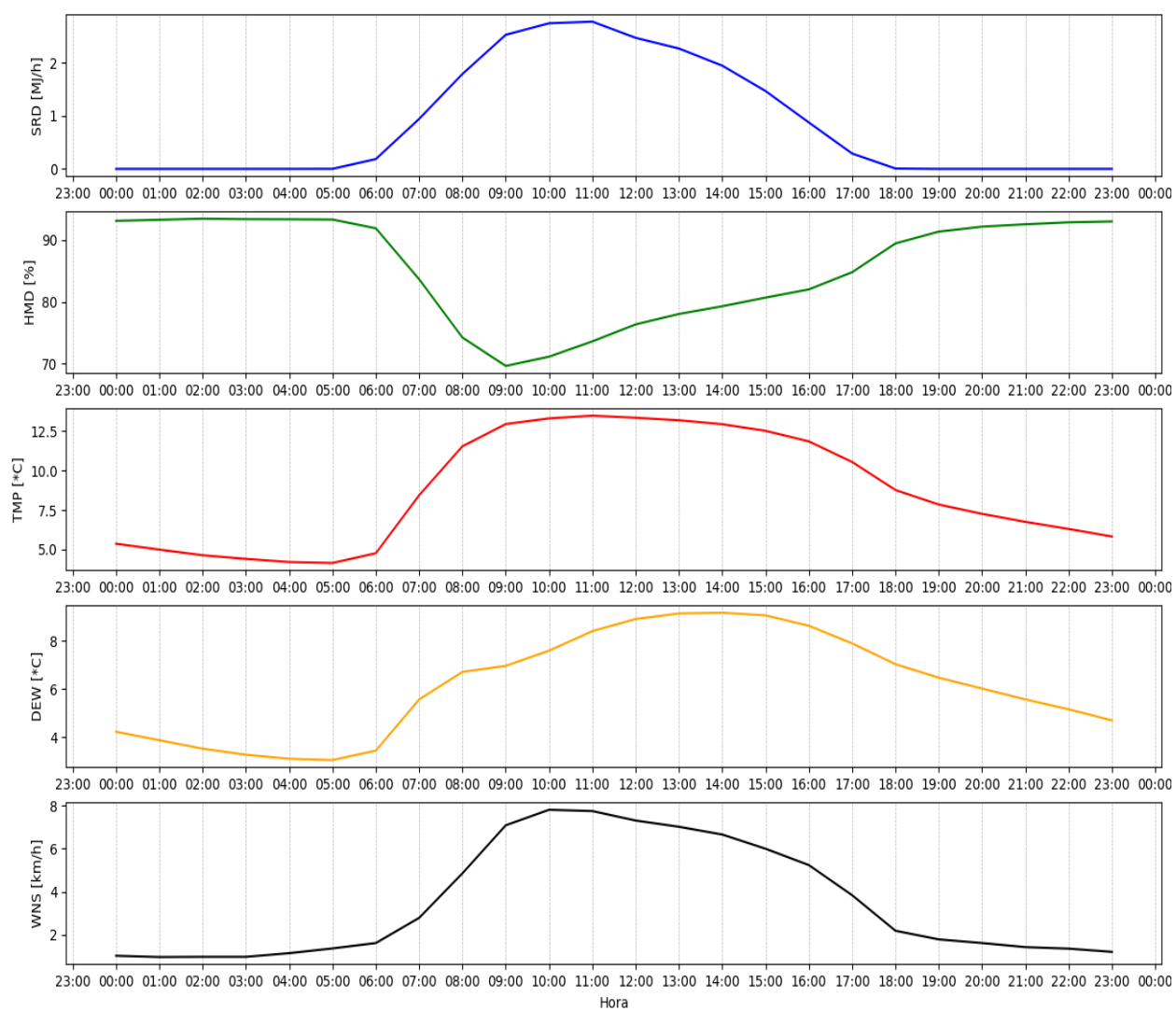


## Anexo L.

### Caracterización hidrometeorológica de la zona

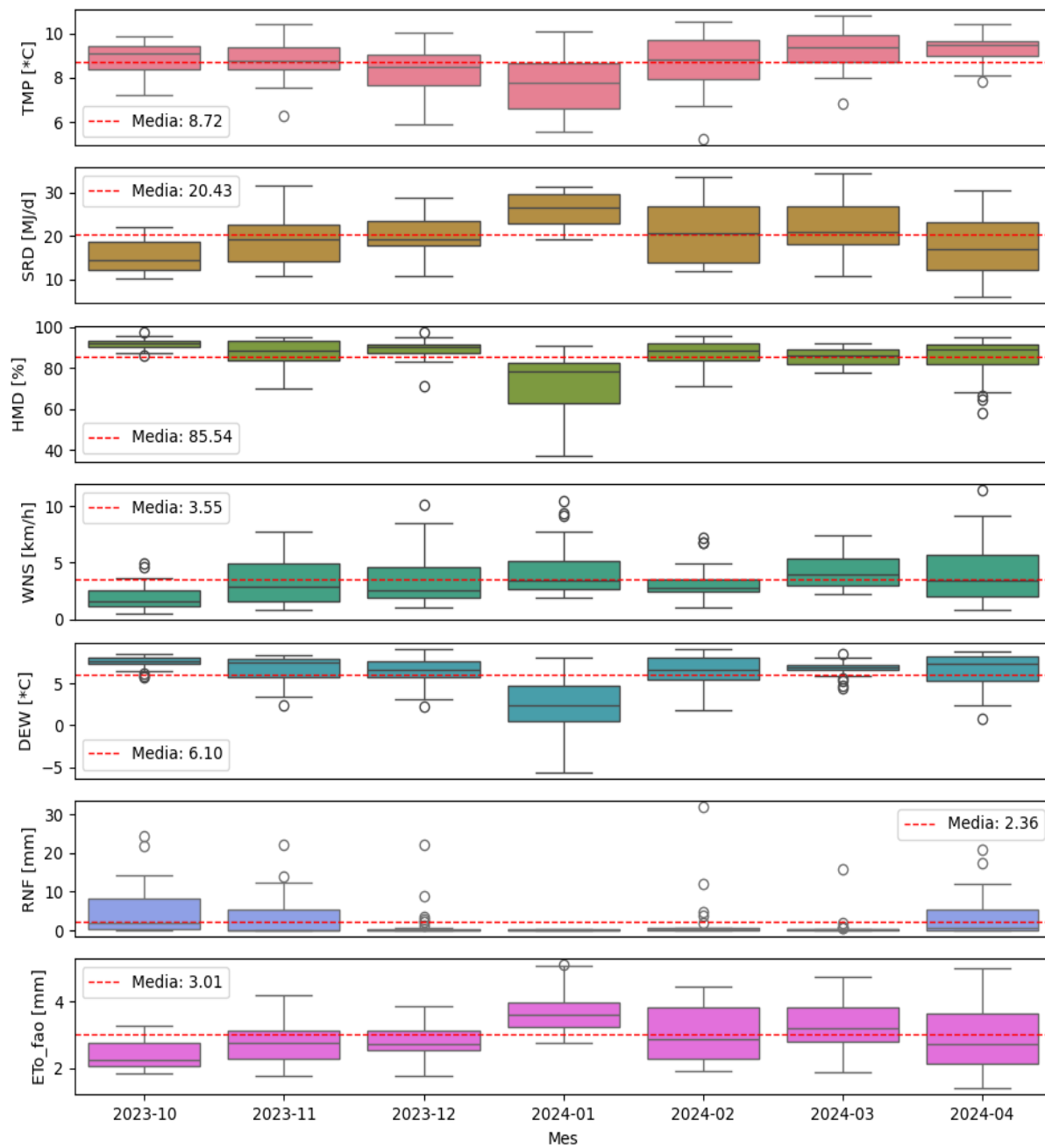
#### Figura L1

#### Oscilaciones horarias promedio de las variables meteorológicas



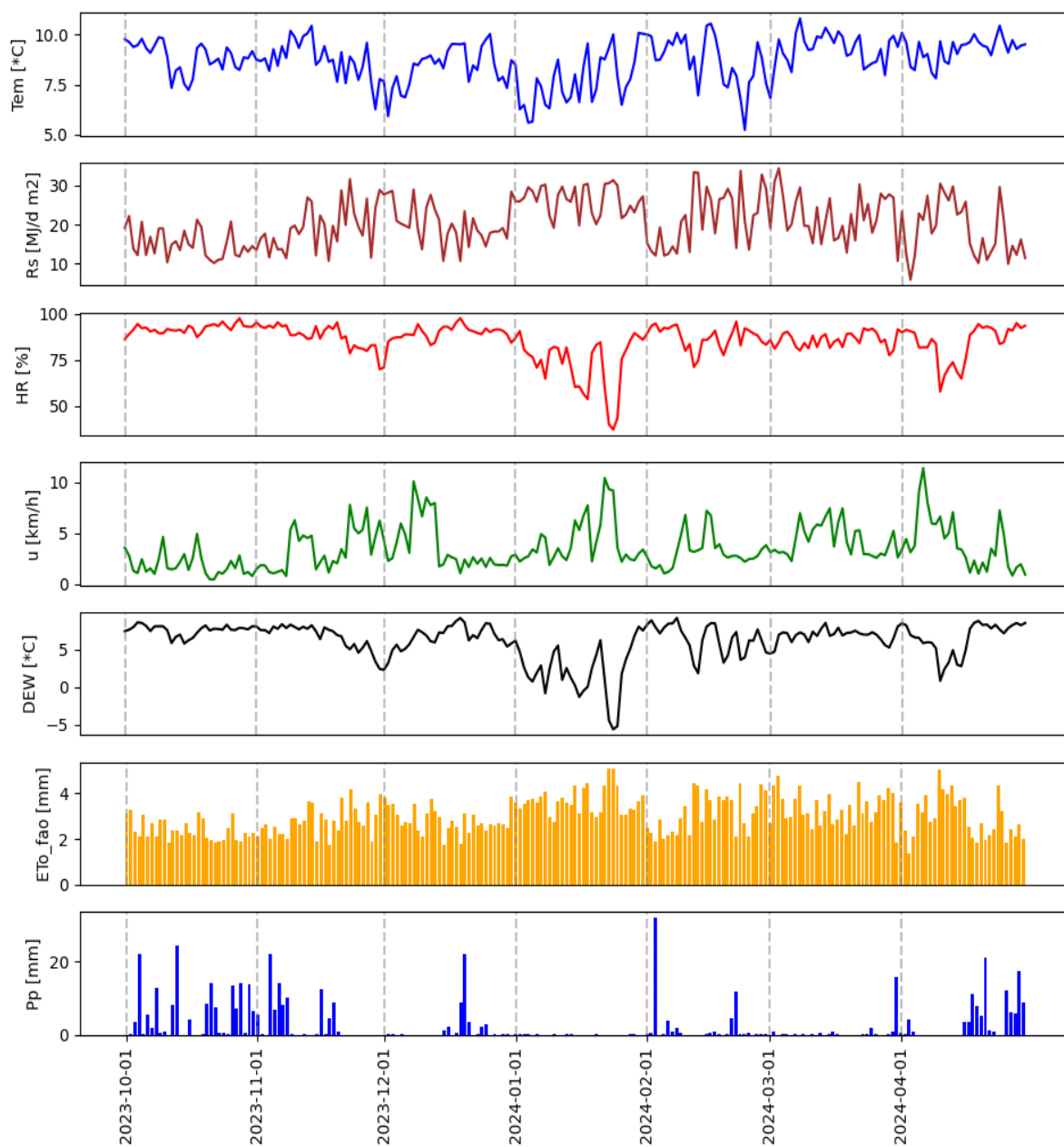
**Figura L2**

*Rangos inter-cuartiles de las variables meteorológicas a nivel diario mensual.*



### Figura L3

Variación diaria de las variables meteorológicas de la zona de estudio



**Tabla L1.** Mínimos y máximos de las variables meteorológicas de la zona a nivel diario.

Unidad	Tmp	Pr	R	HR	U	P	ETo
	(°C)	(°C)	(MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> )	(%)	(km h <sup>-1</sup> )	(mm)	(mm)
<b>Mínimo</b>	-6.80	-5.58	5.90	37.1	0.48	0.0	1.38
<b>Media</b>	8.72	6.10	20.43	85.54	3.55	2.36	3.01
<b>Máximo</b>	19.30	9.19	34.34	97.56	11.39	31.90	5.10
<b>Desv. Estándar</b>	1.08	2.55	6.43	9.70	2.15	5.18	0.78

*Nota:* Radiación solar total mensual (Rs); Humedad relativa (HR); Temperatura mínima (Tmin); Temperatura media (Tmed); Temperatura máxima (Tmax); Temperatura del punto de rocío (Pr); Velocidad del viento (u).

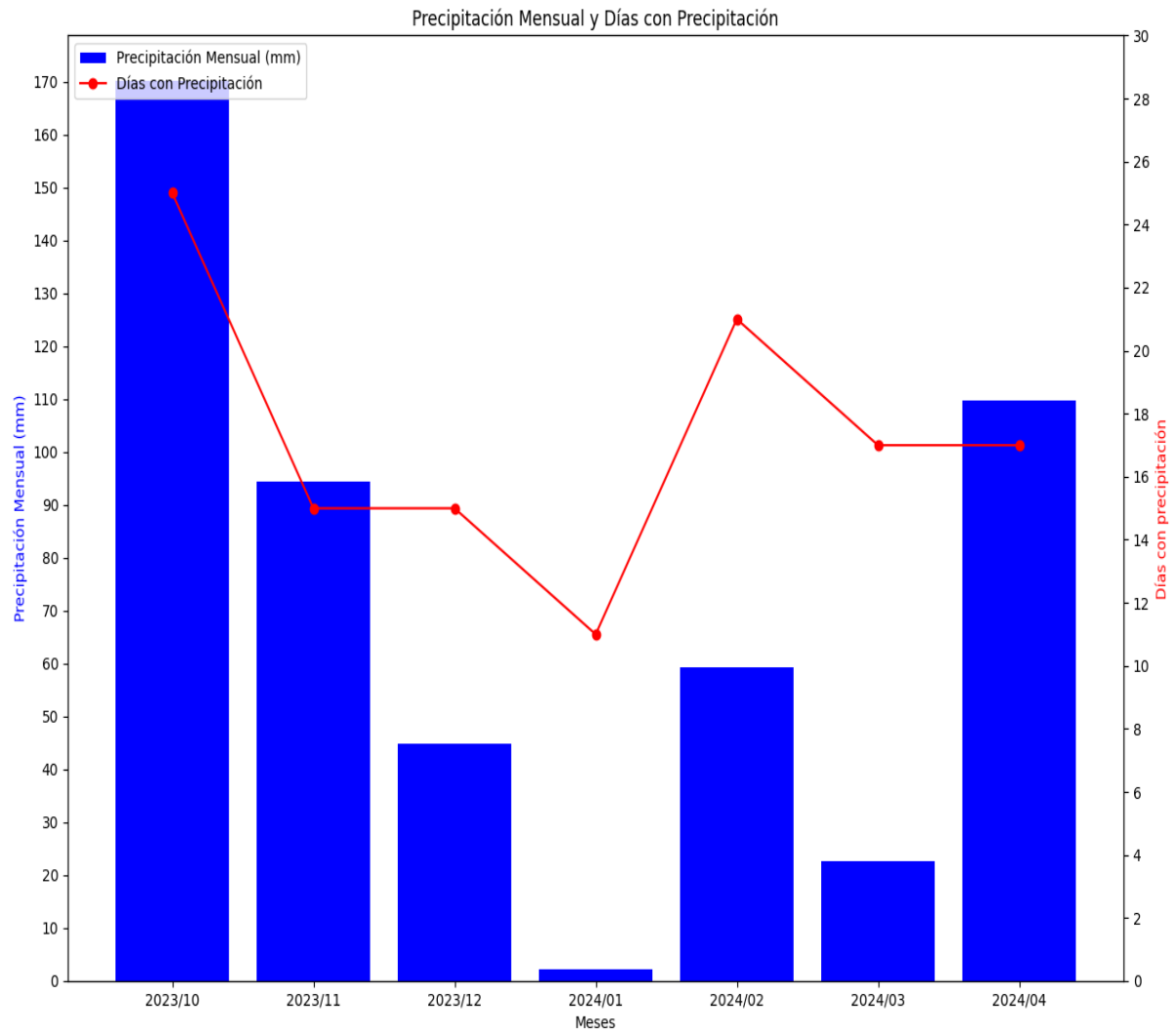
**Tabla L2.** Valores máximos y mínimos meteorológicos diarios de la zona durante el periodo de estudio

Mes	Tmp		Pr		R		HR		U		P		ETo	
	(°C)		(°C)		(MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> )		(%)		(km h <sup>-1</sup> )		(mm)		(mm)	
<b>Oct</b>	17.2	0.1	8.6	5.8	22.1	10.2	97.5	86.2	5.0	0.5	24.4	0.0	3.3	1.8
<b>Nov</b>	16.7	-0.5	8.3	2.4	31.6	10.8	95.3	69.8	7.8	0.8	22.1	0.0	4.2	1.8
<b>Dec</b>	17.3	-3.7	9.1	2.3	28.9	10.7	97.6	70.9	10.1	1.1	22.1	0.0	3.9	1.8
<b>Ene</b>	18.9	-6.8	8.0	-5.6	31.3	19.2	90.6	37.1	10.4	1.9	0.2	0.0	5.1	2.8
<b>Feb</b>	18.8	-4.3	9.2	1.9	33.7	12.1	95.7	71.1	7.2	1.1	31.9	0.0	4.5	1.9
<b>Mar</b>	19.3	-1.0	8.5	4.4	34.3	10.7	92.1	77.5	7.5	2.3	15.9	0.0	4.7	1.9
<b>Abr</b>	19.3	0.9	8.8	0.8	30.4	5.9	94.9	57.8	11.4	0.9	20.9	0.0	5.0	1.4

*Nota:* Tmp = Temperatura; Pr = Punto de rocío; R = radiación solar; HR = Humedad relativa; U = Velocidad del viento; P = Precipitación total del día; ETo = Evapotranspiración de referencia total del día.

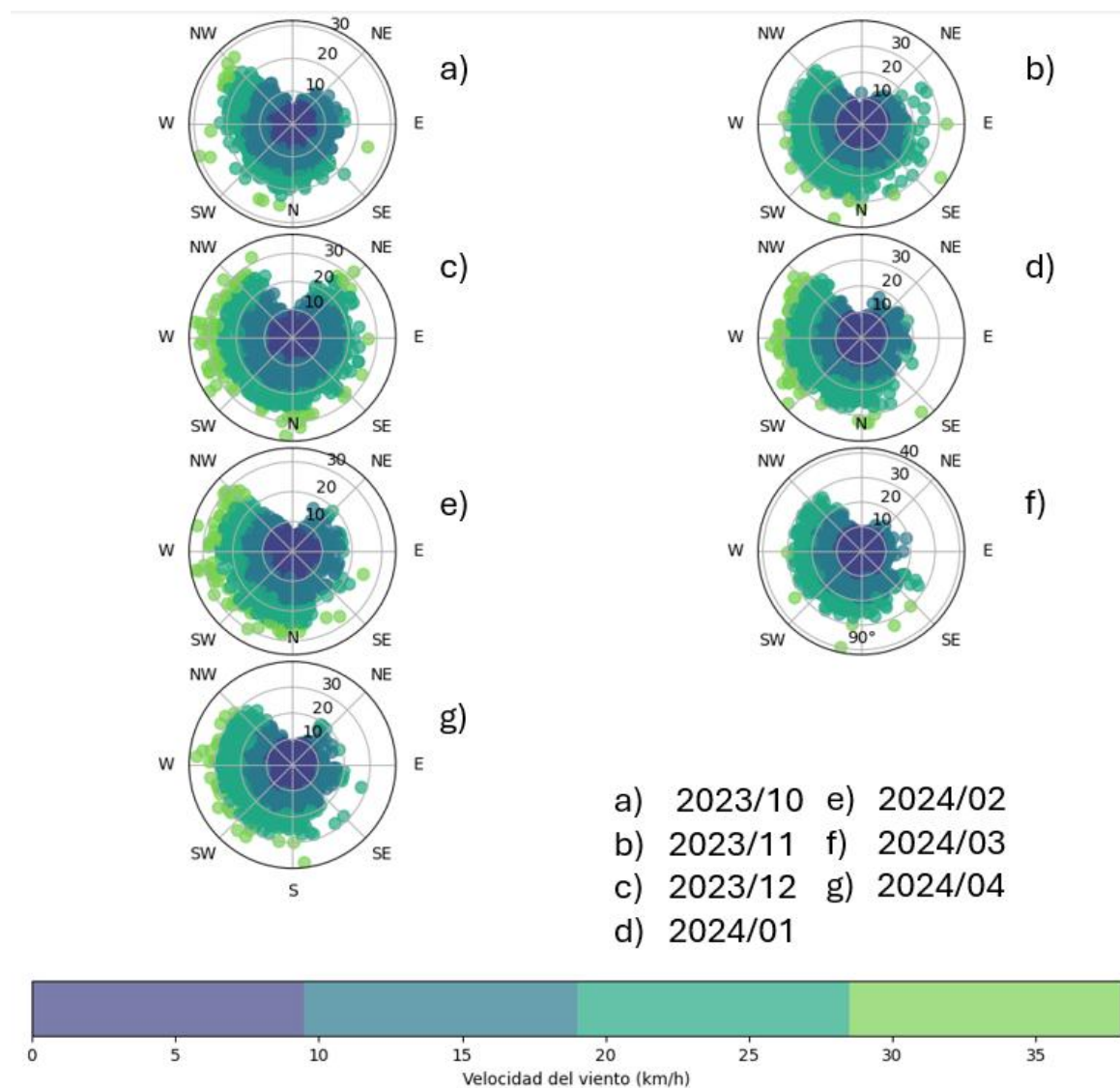
**Figura L4**

*Precipitación total mensual y número de días con precipitación durante el periodo de estudio.*



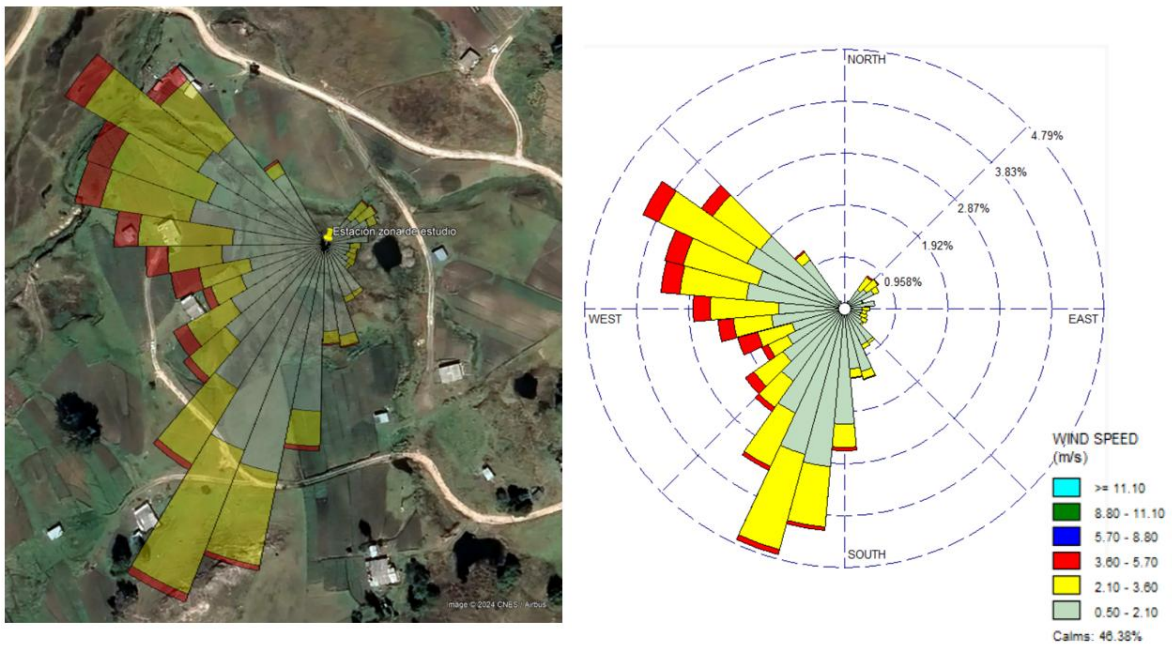
**Figura L5**

*Variaciones mensuales de la velocidad y dirección del viento durante el periodo de estudio*



**Figura L6**

*Variación promedio de la velocidad y dirección del viento en la zona de estudio.*





## Anexo M.

*Balance hídrico del suelo de la sub-parcela de estudio.*

**Tabla M1.**

*Balance de la humedad del suelo a escala semanal.*

Semana	Pp	ETc	R	Dr (i)	L	Porcentaje de Salidas de agua
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]
9/10/2023	33.10	17.15	0.00	-76.28	28.33	85.60%
16/10/2023	34.10	16.30	0.00	-93.14	15.67	45.95%
23/10/2023	36.10	15.49	0.00	-116.57	24.55	68.00%
30/10/2023	54.70	16.15	0.00	-145.57	33.15	60.61%
6/11/2023	32.20	17.73	0.00	-160.53	23.42	72.74%
13/11/2023	25.70	19.76	0.00	-118.83	8.34	32.45%
20/11/2023	0.90	21.80	69.12	-115.22	60.65	86.62%
27/11/2023	0.00	23.35	57.38	-126.73	39.02	68.00%
4/12/2023	0.00	19.15	15.92	-108.61	4.94	31.05%
11/12/2023	3.60	20.08	37.55	-96.37	27.19	66.08%
18/12/2023	37.10	18.09	0.00	-90.53	23.18	62.48%
25/12/2023	2.70	19.31	0.00	-47.28	1.68	62.20%
1/01/2024	0.00	25.35	74.85	-85.75	38.38	51.27%
8/01/2024	0.00	24.27	29.70	-63.67	28.64	96.42%
15/01/2024	0.00	25.45	9.89	-30.39	0.00	0.00%
22/01/2024	0.00	28.29	17.01	32.57	0.00	0.00%
29/01/2024	31.90	20.30	0.00	9.41	12.25	38.39%
5/02/2024	6.90	17.12	0.00	-10.50	2.86	41.42%
12/02/2024	0.70	26.12	5.77	-22.60	0.00	0.00%
19/02/2024	17.10	22.56	0.00	-17.80	9.81	57.37%
26/02/2024	0.00	28.43	13.00	-38.67	0.00	0.00%
4/03/2024	0.00	30.59	15.16	-70.69	14.55	96.01%
11/03/2024	0.00	30.59	30.33	-58.68	13.00	42.86%
18/03/2024	0.00	30.59	27.28	-46.43	13.64	49.98%
25/03/2024	17.80	30.59	0.00	2.76	0.00	0.00%
1/04/2024	5.10	30.59	0.00	-2.21	0.52	10.18%
8/04/2024	0.00	30.59	34.46	-35.81	13.08	37.96%
15/04/2024	52.00	30.59	36.48	-123.96	35.03	39.60%
22/04/2024	25.10	30.59	0.00	-113.88	12.00	47.82%
29/04/2024	26.20	8.74	0.00	-36.94	19.34	73.81%

*Nota: Pp = Precipitación; ETc = Evapotranspiración del cultivo; R = Lámina de riego; L = Lámina de salida de agua del sistema.*

**Tabla M2.***Balance de la humedad del suelo a escala mensual*

Mes	RNF	ETc	R	Dr (i)	L	Porcentaje de Salidas de agua
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]
2023/10	136.2	55.42	0	-330.95	77.28	56.74%
2023/11	93.3	83.58	110.16	-562.86	139.25	68.44%
2023/12	43.4	87.49	69.81	-401.86	73.60	65.01%
2024/01	0.00	114.18	131.45	-140.20	67.01	50.98%
2024/02	56.6	90.6	5.77	-55.96	24.91	39.95%
2024/03	17.8	135.47	85.77	-204.29	41.20	39.77%
2024/04	108.4	131.1	70.94	-312.81	79.97	44.59%

*Nota: Pp = Precipitación total mensual; ETc = Evapotranspiración del cultivo total mensual; R = Lámina de riego aplicada total mensual; L = Lámina de agua de salida del sistema.*

## Anexo N.

### Datos evaluación del sistema de riego

**Tabla N1.** Volumen de agua captada por los vasos pluviométricos prueba realizada 1 de marzo del 2024.

	-4	-2	0	2	4
-4	90	96	155	120	110
-2	84	115	117	76	100
0	70	77	250	92	85
2	70	78	79	85	94
4	X	94	118	120	69

**Tabla N2.** Condiciones meteorológicas durante la prueba realizada 1 de marzo del 2024.

Date	Hora	SRD [W/m2]	HMD [%]	TMP [*C]	RNF [mm]	WND [Grados]	WNG [km/h]	WNG [m/s]	WNS [km/h]	WNS [m/s]	DEW [*C]
1/03/2024	8:30	584	76.2	10.3	0	272	11	3.06	4.0	1.11	6.3
1/03/2024	8:45	709	70.9	11.5	0	320	9	2.50	3.0	0.83	6.4
1/03/2024	9:00	726	66.6	12.6	0	282	11	3.06	3.0	0.83	6.5
1/03/2024	9:15	912	59.8	14.1	0	252	9	2.50	1.0	0.28	6.4
1/03/2024	9:30	925	70.9	12.1	0	159	16	4.44	3.0	0.83	7
1/03/2024	9:45	855	71.9	12.4	0	183	16	4.44	6.0	1.67	7.5
1/03/2024	10:00	361	75.9	10.8	0	196	14	3.89	8.0	2.22	6.7
1/03/2024	10:15	568	74.1	11	0	199	17	4.72	8.0	2.22	6.6
1/03/2024	10:30	739	71.6	12.1	0	162	20	5.56	8.0	2.22	7.1
1/03/2024	10:45	390	74.9	11.1	0	182	14	3.89	6.0	1.67	6.8
1/03/2024	11:00	459	76.5	11.1	0	189	16	4.44	6.0	1.67	7.1
1/03/2024	11:15	491	79	11.1	0	194	19	5.28	9.0	2.50	7.6
1/03/2024	11:30	397	80.3	10.7	0	184	19	5.28	9.0	2.50	7.4
			73.0	11.6	0.0	213.4	14.7	4.08	5.69	1.58	6.88

**Tabla N3.** Volumen de agua captada por los vasos pluviométricos prueba realizada 13 de marzo del 2024.

	-4	-2	0	2	4
-4	96	120	115	100	40
-2	70	120	160	95	42
0	88	165	610	115	64
2	95	120	160	135	57
4	100	120	138	90	61

**Tabla N4.** Condiciones meteorológicas durante la prueba realizada 13 de marzo del 2024.

Date	Hora	SRD [W/m2]	HMD [%]	TMP [*C]	RNF [mm]	WND [Grados]	WNG [km/h]	WNG [m/s]	WNS [km/h]	WNS [m/s]	DEW [*C]
13/03/2024	9:15	626	71.5	14.3	0	312	25	6.94	16	4.44	9.2
13/03/2024	9:30	872	68.5	15.1	0	316	25	6.94	16	4.44	9.3
13/03/2024	9:45	1014	64.6	16.1	0	299	25	6.94	14	3.89	9.4
13/03/2024	10:00	791	63.9	16	0	272	24	6.67	12	3.33	9.2
13/03/2024	10:15	600	73	15.2	0	138	20	5.56	6	1.67	10.4
13/03/2024	10:30	580	79.5	14.6	0	158	16	4.44	6	1.67	11.1
13/03/2024	10:45	560	82.6	14.1	0	165	16	4.44	6	1.67	11.2
13/03/2024	11:00	580	83.5	13.8	0	152	22	6.11	9	2.50	11.1
13/03/2024	11:15	553	85.6	13.5	0	186	20	5.56	11	3.06	11.1
13/03/2024	11:30	784	79.1	15.4	0	179	19	5.28	6	1.67	11.8
13/03/2024	11:45	557	83.1	14.1	0	183	22	6.11	11	3.06	11.3
13/03/2024	12:00	465	75.3	14.8	0	241	16	4.44	4	1.11	10.5
			75.9	14.8	0.0	216.8	20.8	5.8	9.8	2.7	10.5

**Tabla N5.** Volumen de agua captada por los vasos pluviométricos prueba realizada 16 de julio del 2024.

	-4	-2	0	2	4
-4	14	65	125	115	118
-2	24	65	145	135	100
0	25	70	128	130	92
2	32	105	100	117	75
4	38	200	140	140	75

**Tabla N6.** Condiciones meteorológicas durante la prueba realizada 16 de julio del 2024.

Date	Hora	SRD [W/m2]	HMD [%]	TMP [*C]	RNF [mm]	WND [Grados]	WNG [km/]	WNG [m/s]	WNS [km/h]	WNS [m/s]	DEW [*C]
16/07/2024	10:15	1077	71.5	15.7	0	145	20	5.56	11	3.06	10.6
16/07/2024	10:30	1122	71.6	15.9	0	141	20	5.56	11	3.06	10.8
16/07/2024	10:45	1168	72	16	0	155	20	5.56	11	3.06	11
16/07/2024	11:00	1197	73.6	15.9	0	169	22	6.11	12	3.33	11.2
16/07/2024	11:15	1215	72	16.1	0	159	20	5.56	12	3.33	11
16/07/2024	11:30	1244	69	16.7	0	151	24	6.67	12	3.33	11
16/07/2024	11:45	1308	67.5	17.1	0	145	24	6.67	14	3.89	11
16/07/2024	12:00	1311	68	17.2	0	153	22	6.11	12	3.33	11.2
16/07/2024	12:15	1280	70.2	16.6	0	152	24	6.67	14	3.89	11.1
16/07/2024	12:30	1263	70.2	16.7	0	152	25	6.94	14	3.89	11.2
16/07/2024	12:45	1233	70.5	16.6	0	159	25	6.94	12	3.33	11.2
			70.6	16.4	0.0	152.8	22.4	6.2	12.3	3.4	11.0