

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)

Juan David Naranjo Barrios
Ing. Civil

Trabajo de grado
para optar al título de magíster en Ingeniería Civil

Director
Edgar Ricardo Oviedo Ocaña
PhD. en Ingeniería, énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Codirectora
Daniela Cristina Rey Romero
MSc. en Planificación y Desarrollo de Recursos Hidráulicos

Codirector
John Jairo Márquez Molina
PhD. en Ciencias Agropecuarias

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Civil
Bucaramanga
2025

Tabla de contenido

1.	Formulación del Problema.....	10
2.	Justificación	13
3.	Revisión Bibliográfica	15
3.1.	Marco Teórico.....	15
3.1.1.	Ecosistema de Páramo	15
3.1.2.	Requerimientos hídricos de los cultivos	17
3.1.3.	Propiedades del suelo relacionadas con el almacenamiento del agua en el suelo	20
3.1.4.	Evaluación de los sistemas de riego.....	22
3.1.5.	Cultivo de cebolla larga (<i>Allium fistulosum</i>)	28
3.2.	Estado del Arte.....	29
3.2.1.	Prácticas actuales de riego en los ecosistemas de páramo	29
3.2.2.	Gestión del agua para el cultivo de cebolla larga.....	32
3.2.3.	Indicadores de gestión del uso del agua en la agricultura.....	34
4.	Objetivos.....	38
4.1.	Objetivo general.....	38
4.2.	Objetivos específicos	38
5.	Metodología	39
5.1.	Zona de estudio.....	39
5.2.	Fase I: Determinación del escenario actual de riego de una unidad productiva de cebolla larga.....	41
5.2.1.	Actividades previas.....	41
5.2.2.	Selección de la sub-parcela de estudio	41
5.2.3.	Aplicación de entrevista semiestructurada y seguimiento de las prácticas	

locales de riego	42
5.2.4. Instalación de equipos de monitoreo en campo	43
5.2.5. Análisis y comparación de las prácticas locales de riego	44
5.3. Fase II: Caracterización de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo bajo las prácticas actuales de riego.	45
5.3.1. Reconocimiento en campo de la sub-parcela de estudio	45
5.3.2. Recolección periódica de muestras de suelo en campo	45
5.3.3. Determinación de las propiedades hidrofísicas de estudio	47
5.3.4. Análisis de las propiedades hidrofísicas del suelo recolectado en campo	48
5.4. Fase III: Estimación de indicadores de gestión del agua en la agricultura	50
5.4.1. Estimación de las entradas y salidas de agua derivado del balance hídrico en el suelo. 50	
5.4.2. Estimación de los indicadores de gestión del agua para la agricultura (RWS, RIS, RRS).....	52
5.4.3. Estimación de los indicadores de eficiencia del sistema de riego (CU, CUD, WDEL) 53	
5.4.4. Análisis de la eficiencia del sistema de riego implementado en la unidad productiva	55
6. Resultados y Discusión.....	57
6.1. Resultados Fase I: Determinación del escenario actual de riego de una unidad productiva de cebolla larga.....	57
6.1.1. Descripción de las prácticas agrícolas de la zona	57
6.1.2. Seguimiento de las prácticas locales de riego.....	59
6.2. Resultados Fase II: Caracterización de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo bajo las prácticas actuales de riego.....	71
6.2.1. Descripción general de los resultados de los muestreos mensuales.....	72
6.2.2. Textura y densidad real del suelo.....	78

6.2.3.	Curva de infiltración y conductividad hidráulica.....	81
6.2.4.	Capacidad de retención de humedad.....	84
6.2.5.	Análisis espacial de las propiedades evaluadas del suelo.....	87
6.2.6.	Análisis temporal de las propiedades hidrofísicas del suelo.....	93
6.3.	Resultados Fase III: Estimación de indicadores de gestión del agua en la agricultura	102
6.3.1.	Caracterización hidrológica de la zona de estudio.....	102
6.3.1.	Balance hídrico del suelo de la sub-parcela de estudio.....	105
6.3.2.	Estimación de los indicadores de gestión del agua para riego.....	110
6.3.3.	Estimación de indicadores de eficiencia del sistema de riego	120
7.	Propuestas de mejora de la gestión del agua para riego en ecosistema de páramo	129
8.	Conclusiones	134
	Referencias Bibliográficas	140

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Metodología aplicada a la investigación.</i>	39
Figura 2. <i>Mapa de localización de la zona de estudio.</i>	40
Figura 3. <i>Fotografía a detalle de la unidad de muestreo.</i>	42
Figura 4. <i>Esquema de las zonas de recolección de las muestras de suelo de la sub-parcela de estudio.</i>	45
Figura 5. <i>Esquema de distribución de los vasos pluviométricos en la sub-parcela de estudio.</i>	54
Figura 6. <i>Elementos para la evaluación de la eficiencia del sistema de riego implementado.</i>	55
Figura 7. <i>Precipitación media mensual multianual entre 1968 - 2023 y promedio de días de precipitación mensual según la estación IDEAM Picacho.</i>	61
Figura 8. <i>Variación de la precipitación anual estación IDEAM Picacho entre los años 1967 – 2023.</i>	62
Figura 9. <i>Fuentes hídricas disponibles de la unidad productiva de estudio</i>	63
Figura 10. <i>Lago principal de la unidad productiva de estudio en temporada de lluvias y de sequía.</i>	64
Figura 11. <i>Tipos de aspersores presentes en la unidad productiva.</i>	67
Figura 12. <i>Seguimiento de los días de riego y de precipitación en la unidad productiva de estudio.</i>	70
Figura 13. <i>Horizontes del suelo de estudio.</i>	72
Figura 14. <i>Dispersión de los resultados de las propiedades evaluadas mensualmente del suelo agrupadas por profundidad.</i>	74
Figura 15. <i>Textura del suelo en los puntos de muestreo.</i>	79
Figura 16. <i>Curva de infiltración instantánea y acumulada del suelo en la sub-parcela de estudio.</i>	81
Figura 17. <i>Curva de retención de humedad del suelo para las diferentes zonas de la sub-parcela de estudio.</i>	85
Figura 18. <i>Vectores propios de variabilidad de las propiedades del suelo (dos componentes).</i>	88

Figura 19. <i>Variación de las propiedades evaluadas de estudio durante los meses de monitoreo para la zona “alta”</i>	97
Figura 20. <i>Variación de las propiedades evaluadas de estudio durante los meses de monitoreo para la zona “media - baja”</i>	98
Figura 21. <i>Seguimiento de la humedad del suelo de estudio.</i>	106
Figura 22. <i>Representación gráfica de las entradas y salidas de agua en el suelo a escala semanal</i>	110
Figura 23. <i>Variación de los indicadores RIS, RWS y RRS a escala semanal.</i>	116
Figura 24. <i>Representación gráfica distribución de aplicación del riego durante las tres pruebas de eficiencia.</i>	124

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Propiedades del suelo evaluadas</i>	21
Tabla 2. <i>Información requerida para la estimación de indicadores de rendimiento de los sistemas de riego</i>	23
Tabla 3. <i>Categorías de la velocidad del viento.</i>	27
Tabla 4. <i>Láminas de consumo de agua por parte del cultivo de cebolla larga</i>	33
Tabla 5. <i>Especificaciones técnicas de los equipos instalados en campo</i>	44
Tabla 6. <i>Plan de muestreo de suelo</i>	46
Tabla 7. <i>Ensayos para la determinación de las propiedades hidrofísicas de las muestras de suelo extraídas.</i>	48
Tabla 8. <i>Especificaciones de operación aspersores en uso de la unidad productiva</i>	67
Tabla 9. <i>Fecha, duración y estimación de lámina de riego de la sub-parcela de estudio durante el periodo de estudio.</i>	69
Tabla 10. <i>Resumen estadístico de la caracterización preliminar del suelo</i>	73
Tabla 11. <i>Constantes de humedad y disponibilidad de agua del suelo de estudio.</i>	84
Tabla 12. <i>Variabilidad respondida por cada uno de los componentes</i>	88
Tabla 13. <i>Comparación de las propiedades químicas del suelo de estudio por punto de muestreo</i>	90
Tabla 14. <i>Comparación de las propiedades evaluadas del suelo por zona de muestreo.</i>	91
Tabla 15. <i>Resumen meteorológico mensual de la zona durante el periodo de estudio.</i>	104
Tabla 16. <i>Valores semanales de los indicadores de rendimiento hídrico en la zona de estudio</i>	112
Tabla 17. <i>Condiciones operacionales y meteorológicas promedio de las evaluaciones realizados</i>	121
Tabla 18. <i>Resultados de los indicadores de eficiencia del sistema de riego implementado.</i>	122

Anexos

Ver anexos adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS

Anexo A. *Proceso y resultados de la revisión de literatura.*

Anexo B. *Formato de entrevista semiestructurada.*

Anexo C. *Formato observacional en campo.*

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

Anexo E. *Proceso de calibración sensor de humedad*

Anexo F. *Formato de evaluación de la eficiencia del sistema de riego por aspersión.*

Anexo G. *Datos crudos de las propiedades del suelo evaluadas.*

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

Anexo I. *Resultados calibraciones contenido de humedad – índice de refracción*

Anexo J. *Resultados calibraciones sensor de humedad*

Anexo K. *Validez de los datos meteorológicos.*

Anexo L. *Caracterización hidrometeorológica de la zona.*

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

Anexo N. *Indicadores de gestión del agua para riego a escala mensual.*

Anexo O. *Datos evaluación del sistema de riego.*

Anexo P. *Propuesta de calendario de riego para la unidad productiva de estudio.*

Resumen

Título: 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) *.

Autor: Juan David Naranjo Barrios **

Palabras clave: Indicadores de gestión del agua, gestión hídrica, suelo agrícola, *Allium fistulosum*, páramo.

Descripción:

El crecimiento poblacional ha impulsado la expansión agrícola, afectando ecosistemas estratégicos como el páramo de Berlín, esencial para la regulación hídrica de los departamentos de Santander y Norte de Santander, Colombia. Este estudio evaluó la gestión del agua para riego en una unidad productiva de cebolla larga (*Allium fistulosum*) mediante entrevistas semiestructuradas, formatos observacionales e instalación de equipos de monitoreo (estación meteorológica, sensores de humedad y caudalímetro), además de la caracterización físico-química del suelo, incluyendo parámetros como densidad aparente (Da), pH, porosidad (Pr), humedad gravimétrica (Hm), carbono orgánico del suelo (COS), materia orgánica en el suelo (MO), entre otros, durante cinco meses. Adicionalmente, se emplearon indicadores de gestión y eficiencia del riego, como RIS (suministro relativo de riego), RWS (suministro relativo de agua), RRS (suministro relativo de lluvia) por sus siglas en inglés, CUC (Coeficiente de Uniformidad de Christiansen), CUD (Coeficiente de Uniformidad de Distribución) y WDEL (Pérdidas de Agua por Efecto del Viento), con el fin de identificar deficiencias y generar propuestas en el manejo hídrico. Los resultados evidenciaron un riego sin planificación técnica, basado en observaciones empíricas de las condiciones climáticas semanales y en la disponibilidad de los agricultores, quienes combinan esta actividad con otras tareas como ordeño y manejo de ganado, lo que provoca aplicaciones de hasta 2.6 veces las necesidades hídricas del cultivo. El suelo mostró una baja capacidad de retención hídrica (<6%) y una alta tasa de infiltración (27.5 cm/h), atribuida a su textura predominantemente arenosa y un moderado contenido de MO (<18.6%), factores que favorecieron la pérdida de agua por percolación de hasta un 47.5% de las entradas de agua. Aunque la precipitación y el riego superaron la ETc del cultivo, reflejando disponibilidad de agua en la zona, los indicadores revelaron un manejo ineficiente, con valores de RIS de hasta 47.73, RWS de 7.42, baja uniformidad del riego (CUC = 65.2%, CUD = 50.6%) y pérdidas significativas por viento (WDEL = 14.0%). Ante estos hallazgos, se proponen mejoras centradas en la implementación de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), como la capacitación técnica de los agricultores, instalación de equipos de medición y el diseño de estrategias de riego basadas en balances hídricos del suelo y monitoreo continuo, que permitan optimizar el uso del agua y reducir el impacto sobre el ecosistema de páramo. La falta de eficiencia en la gestión hídrica no solo compromete la sostenibilidad ambiental del páramo, sino que también agrava la percepción de escasez hídrica en la región, amenazando a largo plazo la seguridad hídrica de las comunidades que dependen de este vital recurso. Estos resultados resaltan la necesidad de adoptar prácticas agrícolas sostenibles que equilibren la productividad con la conservación de los servicios ecosistémicos esenciales.

***Trabajo de Grado ** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil, Maestría en Ingeniería Civil. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, PhD. Codirectora: Daniela Cristina Rey Romero, MSc, Codirector: John Jairo Marquéz Molina, PhD.**

Abstract

Title: Analysis of water management for irrigation of a productive unit of green onion (*Allium fistulosum*) under the agroclimatic conditions of the Berlin paramo (Santander - Colombia) *.

Author: Juan David Naranjo Barrios **

Key words: Water management indicators, water management, agricultural soil, *Allium fistulosum*, páramo.

Description:

Population growth has driven agricultural expansion, impacting strategic ecosystems such as the Berlín páramo, essential for water regulation in the departments of Santander and Norte de Santander, Colombia. This study evaluated water management for irrigation in a production unit of scallion (*Allium fistulosum*) through semi-structured interviews, observational formats, and the installation of monitoring equipment (weather station, soil moisture sensors, and flow meter). Additionally, a physical and chemical characterization of the soil was conducted, including parameters such as bulk density (Da), pH, porosity (Pr), gravimetric moisture (Hm), soil organic carbon (SOC), soil organic matter (MO), among others, over a five-month period. Furthermore, irrigation management and efficiency indicators were employed, such as Relative Irrigation Supply (RIS), Relative Water Supply (RWS), Relative Rain Supply (RRS), Christiansen's Uniformity Coefficient (CUC), Distribution Uniformity Coefficient (CUD), and Water Loss due to Wind Effect (WDEL), to identify deficiencies and propose improvements in water management. The results revealed irrigation practices lacking technical planning, based on empirical observations of weekly climatic conditions and the availability of farmers, who combine irrigation with other activities such as milking and livestock management. This led to water applications up to 2.6 times the crop's water needs. The soil exhibited low water retention capacity (<6%) and high infiltration rates (27.5 cm/h), attributed to its predominantly sandy texture and organic matter content (<18.6%), factors that favored water losses through percolation, reaching up to 47.5% of the water inputs. Although precipitation and irrigation exceeded the crop's ETC, reflecting water availability in the area, the indicators revealed inefficient water management, with RIS values of up to 47.73, RWS of 7.42, low irrigation uniformity (CUC = 65.2%, CUD = 50.6%), and significant wind-related water losses (WDEL = 14.0%). In response to these findings, improvements are proposed focusing on the implementation of Good Agricultural Practices (GAP), including technical training for farmers, installation of measurement equipment, and the design of irrigation strategies based on soil water balances and continuous monitoring to optimize water use and reduce the impact on the páramo ecosystem. The inefficiency in water management not only jeopardizes the environmental sustainability of the páramo but also exacerbates the perception of water scarcity in the region, posing long-term threats to the water security of communities relying on this vital resource. These results highlight the need to adopt sustainable agricultural practices that balance productivity with the conservation of essential ecosystem services.

***Degree thesis ** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering, Master of Science in Civil Engineering. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, PhD. Co-director: Daniela Cristina Rey Romero, MSc, Codirector: John Jairo Marquéz Molina, PhD.**

1. Formulación del Problema

Ante el crecimiento poblacional proyectado para el año 2050 de aproximadamente 9.7 billones de personas (ONU, 2022), la Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) señala que se deberá de aumentar en más de un 50% la producción de alimentos para satisfacer la futura demanda (FAO, 2020). Producción que actualmente consume cerca del 70% del agua dulce disponible mundialmente (Alemie et al., 2023).

En Colombia, la demanda hídrica del sector de la agricultura y postcosecha es de aproximadamente el 43.25% de la demanda total multisectorial, en donde se ha presentado una ligera reducción del 13% entre los años 2016 y 2020 (de 16066 a 13984 millones de m³/año). No obstante, la agricultura continúa liderando el consumo de agua en comparación con los demás sectores (hidroenergía, doméstico, minería, entre otros) (IDEAM, 2023). Este descenso en el consumo refleja avances en la eficiencia hídrica del sector, posiblemente impulsados por políticas de gestión del agua y la adopción de tecnologías más eficientes. Sin embargo, persiste la necesidad de seguir optimizando el uso del recurso hídrico ante los retos del cambio climático y la creciente competencia por el agua entre distintos sectores productivos, especialmente en ecosistemas estratégicos como los páramos, fundamentales para la regulación y provisión de agua.

Los ecosistemas de páramos aportan cerca del 80% del agua utilizada en actividades agrícolas, industriales y domésticas en países andinos como Colombia, Venezuela y Perú, beneficiando cerca de 100 millones de personas (Avellaneda et al., 2018; Benavides et al., 2018; Buytaert et al., 2006) Además, son cruciales para la generación hidroeléctrica y la conservación de ecosistemas acuáticos (Luethje et al., 2023; Vásquez et al., 2022). En los

últimos años se ha observado un aumento en el desarrollo de actividades económicas en las regiones de páramo, incluyendo turismo, agricultura, minería, ganadería, entre otras (Díaz et al., 2020; Espinosa & Rivera, 2016). La intensificación de estas actividades altera el ecosistema local, afectando su biodiversidad y funciones ecológicas (Fernández et al., 2019), además de provocar una transformación del paisaje debido al espacio requerido para su desarrollo, generando así una serie de impactos ambientales y sociales significativos, como cambios en la cobertura del suelo, introducción de especies invasoras, alteraciones en las dinámicas sociales locales, disminución en la retención de humedad del suelo, contaminación difusa del suelo y de fuentes hídricas, así como altas tasas de extracción de agua para consumo y riego de cultivos (Avellaneda et al., 2022; J. Díaz et al., 2020; Garavito, 2015; Luthje et al., 2023; Patiño et al., 2021; Restrepo et al., 2008; Rey-Romero et al., 2022; Sarmiento et al., 2017).

En Colombia, la expansión agrícola ha reducido considerablemente la cobertura vegetal endémica de los ecosistemas de páramo, en especial para los complejos de páramo localizados en la cordillera oriental, cuya intervención es de aproximadamente el 20.5% de su superficie (Sarmiento et al., 2017). En esta zona se encuentra el municipio de Tona – Santander, el cual es el segundo mayor productor de cebolla larga (*Allium fistulosum*) del país (Agronet, 2022; Agronet & Min Agricultura, 2017).

El páramo de Berlín (perteneciente al Complejo de Páramos Jurisdicciones-Santurbán-Berlín) concentra la mayor parte de producción del cultivo de cebolla larga del municipio de Tona y de Santander. Sin embargo, debido al empleo de prácticas agropecuarias convencionales se ha generado el deterioro del ecosistema local (CDMB, 2020; Celis, 2022; Patiño, 2021; Rey-Romero et al., 2022). Entre ellas, se destaca el elevado consumo de agua

para riego, establecimiento de monocultivos y un desequilibrio ecológico (Vásquez, 2014). Esta realidad se acentúa al considerar la falta de asistencia institucional adecuada y de estudios técnicos que estimen las necesidades hídricas reales de los cultivos acorde a las condiciones edafoclimáticas del ecosistema (Neira et al., 2020).

Lo anterior puede favorecer la aplicación excesiva de agua, generando una reducción en la oferta del recurso hídrico para los usuarios aguas abajo, además de promover procesos de transporte de nutrientes, lavado de sales y plaguicidas hacia aguas superficiales y subterráneas (Abd El-Wahed et al., 2016). Por lo anterior, es necesario tomar medidas que ayuden a promover una agricultura más sostenible y responsable con el medio ambiente en ecosistemas estratégicos como es el caso del Páramo de Berlín, a fin de asegurar la conservación de los recursos naturales y garantizar la calidad de vida de las comunidades locales.

Con el fin de contribuir a la búsqueda de soluciones ante esta situación, el presente trabajo aborda las siguientes preguntas de investigación: ¿Cómo se gestiona el agua para riego en una unidad productiva de cebolla larga bajo las condiciones agroclimáticas del páramo de Berlín?; ¿Cómo son las prácticas de riego de la unidad de producción de cebolla larga?; ¿Cómo es la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo de una unidad productiva de cebolla larga?; por último, ¿cuál es la eficiencia del sistema de riego implementado en una unidad productiva de cebolla larga representativa de la zona?

2. Justificación

Los ecosistemas de páramo regulan y proveen agua de excelente calidad a las tierras altas andinas de Venezuela, Colombia, Ecuador y el norte de Perú (Buytaert et al., 2006), siendo fundamentales para ciudades capitales como Bogotá y Quito, así como para otras ciudades intermedias (Buytaert et al., 2007; Llambí et al., 2020). Con solo el 1.7% del territorio colombiano, los páramos abastecen a 10 de las 32 capitales, cubriendo el 70% de la demanda hídrica y beneficiando cerca de 17 millones de personas (Andrade et al., 2018; Hofstede et al., 2014; Sarmiento et al., 2017). Además, brindan servicios ecosistémicos claves como la regulación climática, conservación de la biodiversidad, producción de alimentos, entre otros (Andrade et al., 2018; Molina et al., 2019; Vásquez & Buitrago, 2011).

A pesar de su protección mediante leyes nacionales y políticas internacionales como por ejemplo la Ley de páramos (Ley 1930 de 2018) y los Objetivos de Desarrollo sostenible (ODS), los páramos enfrentan transformaciones significativas debido al desarrollo de actividades antrópicas (pastoreo, agricultura, minería, entre otros) (Buytaert et al., 2006; Espinosa & Rivera, 2016; Llambí et al., 2020), las cuales impactan negativamente el ecosistema local ocasionando la afectación del suministro y calidad del agua (Leroy & Barrasa, 2021; Mosquera et al., 2023), en donde la agricultura es responsable en gran medida de esta problemática (Mosquera et al., 2023; Patiño et al., 2021; Thompson et al., 2021).

El páramo de Berlín abastece de agua a las ciudades de Bucaramanga, Cúcuta y Pamplona (Amarocho et al., 2024). En reconocimiento a su valor ambiental, la protección de este ecosistema ha sido priorizada en diversas normativas y políticas tanto regionales como nacionales (Plan de Manejo Ambiental del Páramo Santurbán – Berlín, las Leyes 99 de 1993 y 1930 de 2018, además del Decreto 1640 de 2012), en consonancia con compromisos

internacionales en particular el ODS 6 (agua limpia y saneamiento) y el ODS 15 (vida de ecosistemas terrestres) (Naciones Unidas, 2018). No obstante, esta zona corresponde a una región productora de cultivos de cebolla larga y de papa (*Solanum tuberosum*), en donde se ha evidenciado transformaciones del ecosistema local producto de la agricultura (Vásquez et al., 2015). Entre los impactos evidenciados en esta región asociados al cambio en el uso del suelo, se incluyen la contaminación de aguas superficiales debido al uso intensivo de agroquímicos (Rey-Romero et al., 2022), alteraciones en las propiedades del suelo (Patiño, 2021) y del caudal base de fuentes hídricas superficiales (Celis, 2022), uso irracional de agua en los sistemas de riego y aumento de la frontera agrícola (Restrepo et al., 2008). Además, de la percepción local en la reducción de la oferta hídrica producto del actual crecimiento de zonas turísticas y al aumento de la población en la región (Amarocho et al., 2024).

Entender el estado actual de la gestión del riego en los cultivos de cebolla larga de la zona no sólo contribuye a identificar alternativas que lleven al uso racional del agua, sino que también respalda la implementación de políticas de conservación. La identificación de factores que afectan la eficiencia en la aplicación del riego y la capacitación de los agricultores, pueden reducir el volumen de agua destinado a esta actividad, lo que se alinea con los objetivos establecidos en la gestión integrada del recurso hídrico y las guías internacionales de la FAO sobre prácticas agrícolas sostenibles. De esta manera, una mayor eficiencia en el uso del agua contribuye a la mitigación de potenciales conflictos sobre el manejo de este recurso vital, favoreciendo la sostenibilidad y el equilibrio entre la actividad agrícola y la conservación del ecosistema.

3. Revisión Bibliográfica

3.1. Marco Teórico

Esta sección presenta el marco conceptual empleado para el desarrollo de la presente investigación, incluyendo: i) descripción del ecosistema de páramo; ii) requerimientos hídricos de los cultivos; iii) propiedades del suelo relacionadas con la gestión del agua para riego; iv); evaluación de los sistemas de riego; v) características del cultivo de cebolla larga.

3.1.1. *Ecosistema de Páramo*

Los páramos son ecosistemas neotropicales únicos de alta montaña, esenciales para la gestión de los recursos hídricos sudamericanos, dado que cumplen funciones ecológicas relacionadas con la captación, regulación y el suministro de agua (Avellaneda et al., 2018). Se localizan a lo largo de la cordillera de los Andes, desde la cordillera de Mérida en Venezuela, pasando por Colombia, Ecuador y terminando en la depresión de Huancabamba al norte de Perú, cubriendo un total de 24.300 km², sin embargo, existe una pequeña franja (cerca de 250 km²) localizado en Costa Rica y Panamá (Hofstede et al., 2014). A nivel altitudinal, los páramos se localizan entre la línea de bosques andinos (3000 – 3500 msnm) y la línea de nieves perpetuas (por encima de los 4000 msnm) (Cuatrecasas, 1958).

Son ecosistemas fríos, húmedos, de baja presión atmosférica, fuertes vientos, alta nubosidad y radiación solar, debido a su elevada altitud y a su cercanía con la línea ecuatorial, lo que genera una radiación solar constante a lo largo del año, provocando a su vez altas fluctuaciones de la temperatura durante el día (más de 20 grados) (Buytaert et al., 2006). En cuanto a la precipitación, esta oscila entre los 700 y los 3000 mm/año (Gutiérrez & Medrano, 2019; Vásquez & Buitrago, 2011), con promedios de 1000 mm/año (Díaz et al., 2005), y extremos reportados de hasta 6000 mm/año (Buytaert et al., 2006). El régimen de la

precipitación usualmente es bimodal, caracterizada por dos temporadas de altas precipitaciones y dos temporadas de bajas precipitaciones en el año (Hofstede et al., 2014; Vásquez & Buitrago, 2011; Vásquez et al., 2022). Existen casos en donde la precipitación puede caer en forma de nieve o granizo, no obstante, este fenómeno solo sucede en elevadas altitudes y dura solo pocas horas debido a la alta radiación solar (Llambí et al., 2013).

En cuanto a los suelos, estos son conocidos por su alta capacidad de retención hídrica, que obedece a las características físicas y químicas del suelo de páramo (Fernández et al., 2019; Vásquez et al., 2015). Además, de ser ácidos, con bajas concentraciones de nutrientes, ricos en humus y en materia orgánica en su superficie (Patiño et al., 2021), donde predominan los suelos de tipo Andisoles, Entisoles, Inceptisoles e Histosoles (Buytaert et al., 2006), según la taxonomía de suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) (Soil Survey Staff, 2022).

El complejo de páramos Jurisdicciones Santurbán - Berlín, ubicado en los departamentos de Santander y Norte de Santander, Colombia, se encuentra entre las altitudes de 2,200 y 4,100 m.s.n.m. (Restrepo et al., 2008). Las precipitaciones anuales varían entre 698.2 mm y 1,516.9 mm, con una temperatura media anual de 8.8 °C, según los registros de las estaciones climatológicas del IDEAM: *Berlín [37015020]*, *Picacho [23190300]* y *Tona [23190130]* (IDEAM, 2018). Así mismo, en la microcuenca del río Jordán, perteneciente al complejo de páramos, los principales tipos de suelo son Inceptisoles y Andisoles (IGAC, 2018). Por último, a menor escala el páramo de Berlín (zona de estudio), se estima que el 22.6 % del territorio se destina a mosaicos de pastos y cultivos, principalmente de cebolla larga y papa (Macias & Omaña, 2018). No obstante, los suelos de esta zona son altamente

vulnerables a la degradación causada por prácticas agrícolas inadecuadas que se llevan a cabo a nivel local (Patiño, 2021).

3.1.2. Requerimientos hídricos de los cultivos

Los requerimientos hídricos de los cultivos se definen como la lámina de agua necesaria para restablecer las pérdidas por evapotranspiración de un cultivo sano que ocupa una extensión en condiciones no restrictivas de espacio, humedad y de fertilidad del suelo, obteniendo así todo el potencial productivo del cultivo (Doorenbos & Pruitt, 1977). La cantidad de agua necesaria para mantener un cultivo sano se denomina consumo de agua; sin embargo, el agua requerida para la actividad metabólica de la planta es muy poca (menos del 1%), en comparación con las pérdidas de agua en forma de evapotranspiración, de manera que los términos consumo de agua y evapotranspiración de cultivo se utilizan indistintamente (OMM-N-168, 2011).

- ***Evapotranspiración de referencia***

La evapotranspiración de referencia (ET_o) se puede definir como “la evapotranspiración de una superficie de pasto extensa, altura uniforme, que cubre completamente el suelo y sin límite de acceso al agua” (Pereira et al., 2015). El pasto de referencia es un pasto hipotético de 0.12 m de altura, con una resistencia superficial fija de $70 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ y con albedo de 0.23 (Allen et al., 2006). Acorde con la FAO, la ecuación de Penman-Monteith (P-M) (ecuación 1) es la más recomendada para la estimación de la ET_o , al punto que ha llegado a ser un método de estimación estándar basado en información meteorológica (temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento), la cual ha tenido múltiples aplicaciones satisfactorias en todo el mundo (Vásquez

et al., 2022).

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (1)$$

Donde la ET_o corresponde a la evapotranspiración de referencia en mm, R_n es la radiación neta diaria, $(e_s - e_a)$ representa el déficit de presión de vapor del aire, Δ representa la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación, γ es la constante psicrométrica, T es la temperatura media del aire a dos metros de altura y u_2 es la velocidad del viento a dos metros de altura (Allen et al., 2006).

- ***Evapotranspiración del cultivo***

Los requerimientos hídricos de un cultivo de interés se reflejan en forma de evapotranspiración de cultivo (ET_c). Este valor de ET se relaciona con el valor del coeficiente único de cultivo (K_c) y la ET_o (ecuación 2), en donde se representan los efectos integrados de cuatro características principales que diferencian a un cultivo particular del cultivo de referencia, como lo son: i) la altura del cultivo que determina su resistencia aerodinámica, así como la transferencia del vapor de agua desde el cultivo hacia la atmósfera; ii) el albedo de la superficie del cultivo y el suelo, representando la proporción del suelo cubierta por la vegetación; iii) la evaporación que ocurre en el suelo, producto de la parte expuesta del mismo; y iv) la resistencia del cultivo, representada por la transferencia de vapor de agua a la atmósfera que es afectada por el área foliar, edad de la planta y el estado de la hoja (Allen et al., 2006).

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad (2)$$

El valor de K_c varía en función de las etapas del cultivo: en etapas tempranas (K_c inicial) y finales (K_c final) el cultivo requiere menos agua, en comparación con las etapas de

desarrollo y mitad de temporada (K_c medio) cuando el requerimiento es mayor (Allen et al., 2001).

- ***Precipitación efectiva***

El termino de precipitación efectiva (P_e), se refiere a la lámina de agua que logra infiltrarse al suelo y contribuir de forma efectiva al almacenamiento de humedad (OMM-N-168, 2011). Actualmente, el método propuesto por el USDA es uno de los más empleados para estimar la P_e . Sin embargo, al ser un método empírico, en algunos casos este no incluye el efecto de elementos esenciales que afectan la P_e (i.e., cobertura del suelo, textura, intensidad y tiempo de la precipitación, entre otros) (Ali & Mubarak, 2017). Los métodos más precisos para determinar la P_e son aquellos que implican la medición directa de la humedad del suelo antes y después de la precipitación (ecuación 3) (Guo et al., 2018). Esta técnica permite obtener datos más confiables sobre la cantidad de agua que realmente está disponible para los cultivos, ya que tiene en cuenta las variaciones en la infiltración, el escurrimiento y la evapotranspiración, no obstante, este método no es comúnmente empleado debido a los altos costos asociados al requerimiento de personal, equipos, calibración, entre otros (Hasan & Abdullah, 2022).

$$P_e = d * (\theta_{d\acute{e}spues} - \theta_{antes}) \quad (3)$$

donde, $\theta_{d\acute{e}spues} - \theta_{antes}$; corresponde al porcentaje de la diferencia del contenido de humedad del suelo después del evento de precipitación; d: espesor de la capa de suelo en milímetros.

3.1.3. Propiedades del suelo relacionadas con el almacenamiento del agua en el suelo

El suelo desempeña un papel importante en la gestión del riego debido a que funciona como medio de reserva de agua para el cultivo. La capacidad de un suelo de suministrar agua al cultivo depende de diversas propiedades como la textura, cantidad de materia orgánica, pH, entre otros (Vásquez et al., 2017), además de las condiciones hidrológicas locales (lluvia, temperatura, entre otros), de aportes artificiales (riego) y del consumo de las plantas en forma de ET (Jaramillo, 2002). Una manera de cuantificar la cantidad de agua dentro del suelo y su dinámica es mediante la medición de ciertas propiedades, las cuales describen la relación suelo – agua – atmósfera (Cresswell et al., 1992). En la Tabla 1 se presentan las definiciones de las propiedades del suelo empleadas en la presente investigación.

Tabla 1.*Propiedades del suelo evaluadas*

Propiedad	Definición
Textura¹	Proporción en peso de las partículas minerales del suelo con menos de 2 mm de diámetro (arenas, limos y arcillas).
Densidad aparente²	Medida de cuantificación de la compacidad del suelo teniendo en cuenta el espacio ocupado por los poros en relación con el volumen de la muestra de suelo. Refleja la organización de la fracción sólida del suelo y está influenciado por su textura, porosidad, contenido de materia orgánica, humedad y grado de compactación.
Tasa de infiltración³	Corresponde a la velocidad de ingreso del agua perpendicular a la superficie del suelo.
Contenido de humedad²	Medida puntual de la cantidad de agua que posee el suelo. Depende principalmente de la textura del suelo, materia orgánica, fracciones mineral y orgánica, aportes de agua (natural o artificial) y consumo de la planta.
Porosidad^{2,4}	Corresponde al volumen no ocupado por las partículas sólidas del suelo; es el volumen disponible en el suelo para los líquidos y los gases. Afecta de manera directa la escorrentía, la aireación, el crecimiento de raíces, la producción de las plantas, el potencial de erosión, la tasa de infiltración y el contenido de agua en el suelo.
Conductividad hidráulica^{3,2}	Es la relación entre el caudal (flujo) de agua del suelo y el gradiente hidráulico. Depende del diámetro efectivo de poros, de la densidad del suelo, viscosidad dinámica del fluido y del contenido de humedad. Su máximo valor se presenta en suelos saturados.
Constantes de humedad del suelo^{2,5}	Las constantes de humedad del suelo se refieren a las fuerzas de retención que actúan sobre la humedad del suelo. Las constantes de humedad del suelo más utilizadas son las siguientes: Capacidad de campo (CC) : contenido de humedad restante de un proceso de drenaje entre las 48 – 72 horas (-10 y -30 kPa); Punto de marchitez permanente (PMP) : contenido de humedad del suelo a la cual la planta se marchita (-1500 kPa); Agua disponible total (ADT) : humedad del suelo comprendida entre la diferencia de la CC y el PMP.
Contenido de carbono orgánico²	Porcentaje de carbono residual que permanece en el suelo después de la descomposición de cualquier material orgánico. Influye en la estructura del suelo, infiltración y el almacenamiento de agua.
pH⁴	Es el grado de acidez o de alcalinidad del suelo.
Contenido de materia orgánica⁴	Fracción orgánica del suelo conformada por residuos vegetales y animales en diferentes etapas de descomposición, así como células y tejidos de organismos presentes en el suelo, junto con las sustancias producidas por las raíces de las plantas (exudados) y otros organismos.

Adaptado de: ¹(USDA, 2017); ²(Jaramillo, 2002); ³(Huffman et al., 2013); ⁴(Unger, 2006); ⁵(Soil Survey Staff, 2022); ⁶(Ray & Nyle, 2017)

3.1.4. Evaluación de los sistemas de riego

Una alternativa para la evaluación de los sistemas de riego es por medio del uso de indicadores, los cuales son herramientas que facilitan la medición de la eficiencia del sistema de riego y de su gestión, además ayuda a determinar las diferentes fracciones de agua que llega al suelo y es aprovechada por el cultivo (Ayele et al., 2021). Estos indicadores permiten comparar la gestión de agua para riego entre países, regiones, ecosistemas y tipos de gestión e infraestructuras (Molden et al., 1998). Por lo tanto, su uso favorece la identificación de problemas con el sistema de riego implementado y la toma de decisiones informadas para modificación o mejora de las prácticas actuales.

Para la estimación de los indicadores de rendimiento de los sistemas de riego de una zona de interés, se requieren datos sobre meteorología de la zona, aspectos y características del cultivo, variables técnicas del sistema de riego implementado e información sobre prácticas agrícolas locales (Molden et al., 1998). Estos datos pueden obtenerse utilizando estaciones meteorológicas, medidores de caudal, sistemas de información geográfica, y otras herramientas relevantes. La Tabla 2 presenta los datos típicos requeridos para la estimación de los indicadores de rendimiento.

Para el caso particular de la información requerida para la evaluación, los indicadores de estudio están fuertemente relacionados al tipo de sistema de riego implementado, los cuales pueden ser de diferentes tipos como: aspersión, goteo, pivote central, surcos, inundación, entre otros. Dado que cada uno de estos sistemas de riego opera de manera distinta, las características de operación y cuantificación de la lámina de agua aplicada varía. Bajo el contexto de la presente investigación (riego por aspersión) la cuantificación de la lámina de agua se realizó mediante el uso de vasos pluviométricos, los cuales corresponden

a recipientes cilíndricos de dimensiones conocidas distribuidos de forma uniforme dentro del área de cultivo, para después estimar con precisión la uniformidad de la lámina de agua aplicada (UNE, 2017).

Tabla 2.

Información requerida para la estimación de indicadores de rendimiento de los sistemas de riego.

Clima	
Precipitación mensual (mm)	Promedio, mínimo y máxima temperatura diaria (°C)
Velocidad media mensual del viento (m/s)	Promedio mensual de la humedad relativa (%)
Radiación solar diaria (W/m ²) o media de las horas de sol por mes (Horas/día)	
Cultivos	
Área total por temporada, por año, o por cultivo (ha)	Rendimiento del cultivo por año o por temporada (tons/ha)
Patrón de los cultivos de regadío (fechas de plantación, días de crecimiento)	
Riego	
Valor total del agua suministrada al cultivo por temporada, o por año (m ³)	Presión de operación del sistema de riego (kPa)
Lámina de aplicación de agua (mm)	Caudal de operación del sistema de riego (L/s)

Adaptado de: Molden et al., 1998

Los indicadores empleados para la presente investigación se dividieron en dos grupos:

i) indicadores de gestión del agua para la agricultura: se encargan de medir la fracción de agua que llega al cultivo (precipitación y/o riego), permitiendo evaluar la relación entre el agua aplicada y las necesidades hídricas del cultivo (Molden et al., 1998); ii) indicadores de eficiencia del sistema de riego: se basan en la estimación de la uniformidad de la lámina de agua aplicada por los aspersores, además del porcentaje de agua que se pierde por acción de operación y de factores ambientales como la velocidad del viento y la temperatura de la zona (Andrade et al., 2022).

- **Indicadores de gestión del agua para la agricultura**

Oferta relativa de agua (Relative water supply) (RWS): El indicador RWS fue propuesto por Levine (1982). Actualmente es usado para evaluar la cantidad de agua que entra al cultivo con respecto a su requerimiento hídrico (ecuación 4) (Alemie et al., 2023; Ayele et al., 2021; Duarte & Mateos, 2022; Haj-Amor et al., 2018). Valores de RWS entre 0.9 y 1.2 se consideran adecuados para satisfacer las demandas hídricas del cultivo, valores por encima de 1.2 indican exceso hídrico y valores por debajo de 0.9 déficit (Haj-Amor et al., 2018).

$$RWS = \frac{\text{Total de agua suministrada}}{\text{Total de agua que demanda el cultivo}} = \frac{R + Pe}{ET_c} \quad (4)$$

donde R es la lámina de riego suministrado al cultivo (mm); ET_c es la lámina de evapotranspiración de cultivo de interés (mm) y Pe es la lámina de precipitación efectiva (mm).

Oferta relativa de riego (Relative Irrigation Supply) (RIS): Desarrollada por Perry (1996), consiste en la relación entre la cantidad de agua suministrada (riego) y las necesidades netas de riego del cultivo (ecuación 5), de manera que permite conocer si se presenta un riego excesivo o deficiente (Benavides et al., 2021). El valor óptimo del RIS es alrededor de uno, valores inferiores y superiores indican que el cultivo experimenta un riego deficiente o un exceso de riego respectivamente (Kibret et al., 2021).

$$RIS = \frac{\text{Riego suministrado}}{\text{Necesidades de riego del cultivo}} = \frac{R}{ET_c - Pe} \quad (5)$$

Oferta relativa de agua lluvia (Relative Rain Supply) (RRS): Es la relación entre la entrada de agua en forma de precipitación y las demandas de agua del cultivo (ecuación 6), de manera que, solo se considera el suministro de agua en forma de precipitación efectiva, por lo tanto, se puede conocer el porcentaje de aporte de agua lluvia que satisface la demanda hídrica del cultivo (Roldán et al., 2010).

$$RRS = \frac{\text{Aporte de aguas lluvias}}{\text{Necesidades hidricas del cultivo}} = \frac{Pe}{ET_c} \quad (6)$$

- **Indicadores de eficiencia del sistema de riego**

Coficiente de uniformidad de Christiansen (CUC): El coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC) (Christiansen, 1942) (ecuación 7), permite cuantificar la uniformidad de la aplicación de agua del sistema de riego implementado. Este indicador es usado ampliamente para la estimación de la eficiencia de los sistemas de riego por aspersión (Abdisamad & Sener, 2023; Andrade et al., 2022). El CUC representa de forma cuantitativa la variabilidad de la aplicación de agua dentro de un área de evaluación, se determina mediante la siguiente ecuación:

$$CUC = 100 * \left[1 - \frac{\sum_1^n X_i - \bar{X}}{n * \bar{X}} \right] \quad (7)$$

donde CUC corresponde al coeficiente de uniformidad de Christiansen (%); n es el número total de vasos pluviométricos usados; X_i es la lámina de agua recolectada por cada uno de los vasos pluviométricos (mm); y, \bar{X} es el promedio de la lámina de agua recolectada por todos los vasos pluviométricos (mm). Valores de CUC mayores al 90% se consideran “excelentes”, entre el 90% y 80% “buenos”, entre 80% y 70% “aceptables”, entre el 70% y 60% “pobres” y por debajo del 60% “inaceptables” (Andrade et al., 2022).

Coefficiente de uniformidad de distribución (CUD): Autores posteriores a Christiansen como Criddle (1956) promovieron otro parámetro para conocer la uniformidad del sistema de riego, considerando la relación entre la media del cuartil más bajo y la profundidad media del agua recogida por los vasos pluviométricos (ecuación 8), denominado Coeficiente de Uniformidad de la Distribución (CUD).

$$CUD = 100 * \frac{V_{25\%}}{V_a} \quad (8)$$

donde CUD se refiere al coeficiente de uniformidad de distribución (%); $V_{25\%}$ es el volumen medio recibido por el 25% de los vasos pluviométricos que recibieron menos agua en la prueba (mL); y V_a es el volumen medio recogido de los vasos pluviométricos evaluados en la prueba (mL). El CUD es un indicativo del desempeño del aspersor bajo las condiciones de campo, ambiente y presión, en donde un CUD menor del 80% es caracterizado como “ineficiente”, entre el 80 y el 84% como “regular” y por encima del 85% se considera “eficiente” (Palacios et al., 2017).

Pérdidas por evaporación y arrastre del viento (WDEL): Las condiciones meteorológicas y operativas, especialmente el viento, pueden afectar la eficiencia de los sistemas de riego. A medida que aumenta la velocidad del viento, se puede distorsionar las gotas de agua, lo cual puede generar pérdidas por evaporación y arrastre, reduciendo así la uniformidad y eficacia del riego por aspersion (Clavitea et al., 2023). Para evaluar el efecto de la velocidad del viento y de la temperatura de la zona sobre la eficiencia del sistema de riego, se estiman las pérdidas por evaporación y arrastre del viento (WDEL) (*Wind Drift and Evaporation Losses* por sus siglas en inglés) (Frost & Schwalen, 1955). El objetivo del WDEL es determinar el porcentaje del agua suministrada por los

aspersores que llega directamente al suelo (López et al., 2011). El indicador se basa en la comparación de la lámina teórica de agua aplicada por el aspersor y la lámina de agua recolectada por medio de unos vasos pluviométricos uniformemente distribuidos dentro del área mojada del aspersor (ecuación 9).

$$WDEL = 100 * \left(-\frac{L_{Aplicada} - L_{Recolectada}}{L_{Aplicada}} \right) \quad (9)$$

donde $L_{aplicada}$ corresponde a lámina hipotética de agua aplicada al cultivo (mm) y $L_{recolectada}$ es la lámina de agua recogida por los vasos recolectores (mm). La Tabla 3 presenta las categorías de velocidad del viento que deben tenerse en cuenta en el diseño de sistemas de riego por aspersión. Para entornos con baja velocidad del viento (< 2 m/s) las pérdidas podrían ser de aproximadamente 5%, mientras que, para situaciones con velocidades del viento moderadas (entre 2 y 4 m/s), las pérdidas podrían estar próximas al 10% (Gómez, 2010).

Tabla 3.

Categorías de la velocidad del viento.

Categoría	Velocidad del viento (m/s)
No viento	0 - 1.0
Viento medio	1.0 - 2.5
Viento fuerte	2.5 - 4.0
Vientos muy fuertes	> 4.0

Adaptado de: Sapir & Sne (2004)

Diversos investigadores recomiendan realizar evaluaciones periódicas de los sistemas de riego mediante el uso de indicadores de eficiencia, al menos una vez al año, con el fin de identificar posibles deficiencias en el sistema (Andrade et al., 2015; Gutiérrez-Malaxechebarría, 2013; Haj-Amor et al., 2018). Además, sugieren que estas evaluaciones se

deben llevar a cabo si se presenta reducciones o irregularidades en la eficiencia del sistema durante el ciclo de desarrollo del cultivo. Este enfoque permite una detección temprana de fallas y facilita la implementación de medidas correctivas que optimicen el uso del agua y mejoren la productividad agrícola.

3.1.5. Cultivo de cebolla larga (*Allium fistulosum*)

La cebolla larga es cultivada en 20 de los 32 departamentos de Colombia, produciendo anualmente cerca de 327,000 toneladas en 17,000 hectáreas (Kayat et al., 2021; Rodríguez-Robayo et al., 2022). En el caso del páramo de Berlín, la cebolla larga y la papa corresponden al principal sustento económico de múltiples familias de la zona, que llevan a cabo sus actividades productivas basadas en estos dos cultivos, donde se generan en conjunto cerca de 57,000 y 32,000 toneladas por año respectivamente de estos dos cultivos (MinAgricultura, 2017).

La cebolla larga es un cultivo de ciclo corto, permitiendo una primera cosecha después de cinco a seis meses desde la siembra inicial, las demás cosechas se realizan aproximadamente cada cuatro meses. Además, es semipermanente y resistente a las variaciones estacionales, facilitando su siembra para un amplio rango altitudinal; adicionalmente no requiere ser replantada después de cada cosecha, permitiendo la posibilidad de obtener de tres a cuatro cosechas durante un año calendario (Chaparro & Peñalosa, 2012; Gómez et al., 2022; Pinzón, 2004).

No obstante, para lograr una mejor calidad del cultivo se recomienda que éste se cultive en zonas con bajas temperaturas y un alto suministro hídrico, debido a que la cebolla larga contiene aproximadamente un 85% de agua (Huertas et al., 2020). Periodos de una o

dos semanas sin suministro hídrico pueden causar estrés al cultivo, provocando consecuencias negativas en el desarrollo (Kayat et al., 2021).

3.2. Estado del Arte

En el presente apartado incluye una descripción y análisis del estado del arte en relación con los temas de: la agricultura y el riego en los ecosistemas de páramo, gestión del agua para el cultivo de cebolla larga, evaluación de los sistemas de riego por aspersión, y uso de indicadores de gestión del agua en la agricultura. La metodología empleada para el desarrollo del estado del arte se basó en una revisión sistemática de literatura, la cual busca identificar estudios relevantes sobre un tema en específico, tendencias y vacíos en el conocimiento. En el anexo A, se presenta el protocolo de búsqueda y los resultados de la revisión sistemática. Como resultado de la metodología aplicada a la revisión de literatura, se consolidó un total de 67 documentos que tienen relación con las temáticas comentadas anteriormente.

3.2.1. Prácticas actuales de riego en los ecosistemas de páramo

Las investigaciones relacionadas al recurso hídrico de los ecosistemas de páramo se enfocan en su mayoría en: componentes abióticos (p. ej., precipitación, evaporación, caudal) en un 59%, seguido de componentes bióticos (p. ej., metabolismo, ciclo de nutrientes, entre otros) con un 18%, y finalmente los temas sociales (p. ej., pagos por servicios ecosistémicos, impactos sociales, entre otros) con un 23% (Mosquera et al., 2023). En el caso de los estudios de las prácticas y gestión del agua para riego, estas se relacionan con los enfoques abióticos y sociales, ya que esta actividad depende fuertemente de las fuentes hídricas locales, de las adecuaciones al suelo para sus cultivos y de las tradiciones locales (Celis, 2022; Patiño-Gutiérrez et al., 2024).

Las investigaciones sobre las prácticas de riego en ecosistemas de páramo se concentran principalmente en Colombia, Perú y Venezuela. Entre los resultados más relevantes, los investigadores en general comentan que estas prácticas se desarrollan de acuerdo con las tradiciones y conocimientos locales específicos de cada páramo (Leroy, 2019; Leroy & Barrasa, 2021). Así mismo, la FAO denomina este tipo de práctica como “riego informal”, el cual se define como: esquemas realizados bajo responsabilidad local, controlados y operados por la población local en respuesta a sus necesidades percibidas (FAO, 2012).

Una posible explicación de la adopción de estas “*prácticas agropecuarias inadecuadas*”, puede ser que estas se desarrollan en gran medida de manera artesanal (Hofstede et al., 2014), las cuales no solo afectan la degradación del suelo y al desequilibrio de los ecosistemas locales, sino también la eficiencia productiva (Gómez et al., 2022). Este problema se relaciona con la falta de capacitación técnica en varias regiones del país y el bajo nivel educativo de las comunidades rurales en Colombia, donde aproximadamente el 64% de la población solo ha alcanzado estudios de primaria (DANE, 2013). Situación que limita la capacidad de los agricultores para la toma de decisiones informadas, resultando en el uso excesivo de fertilizantes, pesticidas, y métodos ineficientes de manejo de tierras y riego. Adicionalmente, los intentos de transferir tecnologías agrícolas de países desarrollados para proporcionar pautas y manuales basados en prácticas externas han generado problemas con las comunidades campesinas. Esto se debe a que dichas pautas no consideran los desafíos y oportunidades específicos del contexto local (Gómez et al., 2022).

En el caso del riego, esta es una actividad dinámica debido a la actual incertidumbre climática, lo que genera que la decisión de riego se base en el estado actual del tiempo

(Gutiérrez-Malaxechebarría, 2013). Además, también está influenciado por el nivel educativo de los agricultores, la organización social, el conocimiento de buenas prácticas agrícolas (BPA) y la conciencia ambiental sobre los servicios ecosistémicos del páramo (Leroy & Barrasa, 2021; Rodríguez-Robayo et al., 2024).

Investigaciones como la de Celis (2022) señalan que, en una zona del páramo de Berlín, debido a la falta de control en el riego de los cultivos de la zona, se pueden generar sustracciones de 23% al 79% del caudal base de las fuentes hídricas locales, causando una posible escasez de agua en las zonas bajas de la cuenca. Resultados similares al estudio de Ivanova & Marín (2020), donde para el caso del páramo del Rabanal (Boyacá, Colombia), el desarrollo de actividades de riego disminuye hasta en un 27.8% la capacidad de regulación hídrica de la cuenca de estudio. Situaciones que pueden reducir la disponibilidad hídrica en áreas aguas abajo, afectando el equilibrio ecológico del páramo (Díaz et al., 2020). Adicionalmente, la falta de control del riego puede llevar a la contaminación de fuentes hídricas locales por escorrentía o flujos subsuperficiales que arrastran fertilizantes y pesticidas desde los suelos cultivados, afectando la calidad del agua y la salud de los organismos dependientes de estos ecosistemas (Rey-Romero et al., 2022).

El escenario mencionado anteriormente puede llevar a competencias por el recurso hídrico, especialmente en temporadas de sequías. Esta percepción de escasez ya ha sido reportada por la comunidad rural ubicada en cercanías de la laguna de Tota (Boyacá - Colombia), en donde los agricultores han debido organizarse y tomar acciones para racionar el agua. Estas acciones van desde la protección de zonas productoras de agua, adquisición de nuevos sistemas hidráulicos, regulación y sanción por el uso del agua, entre otros (Leroy, 2019; Leroy & Barrasa, 2021; Rodríguez-Robayo et al., 2022; Vásquez, 2014).

Por otro lado, solo el estudio de Clavitea et al. (2023) cuantificó la eficiencia del sistema de riego por aspersión implementado en una zona de alta montaña andina de Perú, encontrando que esta eficiencia se relaciona con la hora de la actividad del riego y disminuye con vientos superiores a 2 m/s. Sin embargo, este estudio no se realizó en una zona agrícola, ya que el objetivo era solo evaluar la eficiencia de los aspersores en condiciones normales de alta montaña. Por consiguiente, las investigaciones relacionadas con las prácticas de riego en ecosistemas de páramo han sido escasas, dejando en evidencia un vacío significativo en el conocimiento sobre el impacto de estas prácticas en el uso del agua en estos ecosistemas estratégicos.

3.2.2. Gestión del agua para el cultivo de cebolla larga

La cuantificación de la demanda hídrica del cultivo de cebolla larga es un proceso complejo influenciado por diversos factores, como el tipo de suelo, las condiciones climáticas locales y la etapa de desarrollo del cultivo (Singh, 2018). Por lo tanto, integrar estas variables en una única estimación de la demanda hídrica del cultivo representa un desafío significativo. Los valores recomendados para el suministro hídrico de la cebolla varían considerablemente entre investigadores, dependiendo del lugar y las condiciones específicas donde se desarrolló cada estudio. La Tabla 4 presenta los valores de suministro hídrico recomendados por diferentes autores, junto con sus respectivas localizaciones y periodos de tiempo para la lámina de agua.

Los sistemas de riego por aspersión son los más adecuados para los cultivos de cebolla larga, acorde con varios autores (Huertas et al., 2020; Sánchez et al., 2021). Además, esta actividad se recomienda que sea frecuente y de corta duración (Huertas et al., 2020; INIA, 2017; Sánchez et al., 2012; Singh, 2018), ya que altas aplicaciones de riego pueden generar

encharcamientos que promueven problemas fitosanitarios, como el hongo *Cladosporium sp.*, así como asfixia en las raíces, pudriciones y lavado de nutrientes (Sánchez et al., 2012). Adicionalmente, se ha observado que los sistemas de riego por goteo o por surcos también pueden ser empleados para estos cultivos, aunque su uso es menos común debido al estrecho espaciado entre las hileras de la cebolla larga (Kayat et al., 2021).

Tabla 4.

Láminas de consumo de agua por parte del cultivo de cebolla larga

Lámina de agua (mm)	Periodo de tiempo	Localización	Referencia
250 – 380	7 – 10 días	California – EEUU	(Smith et al., 2011)
600	90 – 110 días	Colombia – Boyacá	(Pinzón, 2004)
900 y 1500	90 – 110	Colombia – Cundinamarca	(Huertas et al., 2020)
12 a 20	Semanal	Colombia – Boyacá	(Sánchez et al., 2012)

En cuanto a las condiciones del suelo, el cultivo se desarrolla mejor en suelos con textura media (franco-arenosos y francos) (Kayat et al., 2021; Sánchez et al., 2021), debido a su buen drenaje y capacidad de retención de humedad. Además, se recomienda que el suelo sea rico en materia orgánica (Huertas et al., 2020; INIA, 2017; Sánchez et al., 2012) (> 57 g/kg) para aumentar la resistencia del cultivo a las sequías. Por último, se aconseja que el suelo presente una profundidad de mínimo 45 cm, dado que el cultivo de cebolla larga tiene un sistema de raíces poco profunda entre los 20 y 30 cm iniciales del suelo (Huertas et al., 2020; Singh, 2018).

En cuanto al pH del suelo, se observa una discrepancia en la literatura. Algunos autores (INIA, 2017; Kayat et al., 2021; Singh, 2018), sugieren un pH ligeramente ácido, entre 5.3 y 6.8. En contraste, investigadores nacionales (Huertas et al., 2020; Sánchez et al., 2012) proponen un rango de pH entre 6.0 y 7.0. Por otro lado, autores como Padula et al.

(2022) sugieren un pH neutro, oscilando entre 7.0 y 7.4. Por último, en relación con la calidad del agua de riego se encontró que los autores unánimemente recomiendan que el agua de riego tenga una conductividad eléctrica menor a 3.0 dS/m, con el objetivo de evitar problemas por salinidad (Huertas et al., 2020; INIA, 2017). De manera que, la cuantificación de la demanda hídrica de los cultivos de cebolla larga es un tema poco estudiado, debido a que este depende de las condiciones específicas de la zona.

3.2.3. Indicadores de gestión del uso del agua en la agricultura

Actualmente existen diversos indicadores para evaluar la eficiencia de los sistemas de riego y de gestión del agua en la agricultura. Con base a la revisión de literatura se encontró que los indicadores de eficiencia del sistema de riego más empleados actualmente corresponden al CUC (36%), al CUD (22%) y por último WDEL (8.9%) (Tabla A2, Anexo A). Estos indicadores pueden verse afectados por factores hidráulicos, como el espaciado de los aspersores, la presión de operación y las especificaciones del aspersor, así como por factores ambientales, como la velocidad del viento, la temperatura y la humedad (Andrade et al., 2022; Faryabi et al., 2020; Flórez et al., 2013; Moursy & Wasfy, 2022). Además, otro parámetro influyente en la eficiencia de los sistemas de riego es el nivel de capacitación de los agricultores. Maroufpoor et al. (2019) y Faryabi et al. (2020), señalan que las prácticas inadecuadas, como la incorrecta instalación de aspersores y los tiempos prolongados de riego, no sólo reducen la eficiencia, sino que también tienen consecuencias negativas en la gestión del recurso hídrico y en la calidad del cultivo.

En relación con los indicadores de gestión del agua en la agricultura, propuestos por el Instituto Internacional de Gestión del Agua (Molden et al., 1998), se encontró que el más empleado es el RIS (60.4%), seguido de RWS (47.9%), y finalmente el RRS (8.3%) (Tabla

3A, Anexo A). Este último indicador es el menos utilizado debido a que depende de la precipitación total, además que en algunos casos esta no supera la evapotranspiración total del cultivo, generando reportes de bajos valores para este indicador (< 0.4). Como se evidencia en la Tabla 3A, precipitación anual de las zonas de estudio se encuentra en el rango de los 100 – 1710 mm/año en comparación con el rango de ETo de 876 - 4737 mm/año. Por lo tanto, la demanda hídrica del cultivo se satisface en su mayor parte mediante riego en comparación con la precipitación.

En cuanto al indicador RIS, Benavides & Hernández, et al. (2021) señalaron que el indicador RIS está relacionado con la precipitación, el calendario de riego adoptado y el sistema de riego, según un análisis de covarianza (ANCOVA). Un ejemplo es el estudio de Benavides, Mateos, et al. (2021) en la provincia de Guanacaste (Costa Rica) para los cultivos de arroz y caña de azúcar. Los investigadores comentaron que un valor de RIS de 3.13 (valores por encima de 1.0 indican exceso de riego), estaría relacionado con la baja eficiencia de riego, además de la sobreestimación en la demanda de agua de los cultivos y de la deficiencia en el control de las compuertas en el canal de suministro de agua.

Los altos valores de RIS no estarían influenciados solamente por la precipitación, esquema y sistema de riego adoptado, como lo comenta Benavides, Mateos, et al. (2021), sino también la escala de tiempo de la estimación del indicador. Usualmente el RIS se estima con datos anuales o semestrales, lo cual limita detectar periodos temporales de exceso o de estrés hídrico (Andrés & Cuchí, 2014). Esta hipótesis fue corroborada en la investigación de Shongwe & Tsabedze (2021), los cuales encontraron valores de RIS a escala mensual de hasta 15.09, un valor muy alto si se compara con la media de los valores obtenidos durante el periodo de investigación de seis meses (RIS = 3.99). Los investigadores atribuyen este alto

valor de RIS a la adopción de un esquema de riego constante (láminas de riego similares en todos los meses del año), el cual puede causar una sobreestimación de las necesidades hídricas del cultivo debido a la falta de consideración de las fases del cultivo y de la variabilidad de la precipitación de la zona.

El valor de RWS aumenta cuando la precipitación o el riego en la zona son elevados, similar al indicador RIS. No obstante, es importante destacar que en situaciones donde la precipitación en la zona es relativamente baja en comparación con la ETc y se obtienen valores altos de RWS (> 1.2), puede indicar excesos en el suministro de agua. Para ilustrar este punto, se mencionan algunos ejemplos de investigaciones consultadas:

En el estudio de Hakuzimana & Masasi (2020), realizado en Rwanda, los investigadores encontraron que la zona de estudio cuenta con suficiente agua para satisfacer las demandas de los cultivos. Sin embargo, el alto valor del indicador RWS (2.69) se debió a daños en los canales de suministro de riego, lo que provocaba pérdidas de agua significativas. Otro ejemplo es el estudio de Haj-Amor et al. (2018), realizado en Túnez, donde se encontró que el alto valor de RWS (2.60) se debió principalmente a la adopción de prácticas inadecuadas de riego, en particular, las altas duraciones de riego, las cuales podían llegar hasta las 15 horas. Esto causaba un exceso de suministro de agua en una zona donde la precipitación media anual es de menos de 100 mm.

Por último, el indicador RRS evalúa la cantidad de agua recibida en forma de precipitación con las necesidades hídricas de los cultivos, lo que permite comprender la dependencia de la agricultura de las precipitaciones (Moreno & Roldán, 2013), el indicador es particularmente relevante en regiones donde la agricultura depende en gran medida de la

lluvia. Sin embargo, la literatura científica ha presentado escasa atención a este indicador como se mencionó anteriormente. Algunos valores reportados en la literatura se encuentran entre el rango de 0.23 y 0.56 (Tabla 3A, Anexo A). Estos estudios se llevaron a cabo en zonas del mediterráneo, donde los valores presentados se encuentran por debajo de 1.0, lo que indica que la precipitación no contribuye de manera significativa las demandas hídricas de los cultivos.

No obstante, la investigación realizada por Grajales (2017) para el cultivo de aguacate Hass (*Persea americana*) en tres zonas productivas localizadas en los departamentos de Antioquia, Cauca y Tolima (Colombia) respectivamente, informan valores de RRS de hasta 2.05 en promedio. Lo que evidencia un potencial suministro de agua al cultivo en forma de precipitación. Sin embargo, este estudio se realizó en las zonas hidrográficas de Magdalena-Cauca y Pacífico, zonas donde las precipitaciones se encuentran en el rango de los 2000 - 3000 mm/año y con un índice de aridez entre moderado a altos excedentes de agua (ENA, 2022). Lo que podría ser un sesgo debido a que, en otras regiones de Colombia, como la zona Caribe, se presentan precipitaciones generalmente inferiores a 1500 mm anuales y un índice de aridez deficitario de agua (Ideam, 2023), lo que indica una menor disponibilidad de agua para los cultivos, por ende, el valor del indicador en esta zona podría ser menor.

En resumen, los indicadores RIS, RWS y RRS, desempeñan un papel importante para la evaluación de la gestión de los sistemas de riego, proporcionando información crítica sobre la disponibilidad y el uso del agua, lo que facilita la toma de decisiones informadas para garantizar la eficiencia y sostenibilidad en la agricultura. Su aplicación y análisis adecuados son esenciales para maximizar la productividad agrícola y preservar los recursos hídricos bajo un contexto de creciente escasez de agua.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Analizar la gestión del agua para riego de una unidad productiva de cebolla larga (*Allium fistulosum*) cultivada bajo las condiciones agroclimáticas del páramo de Berlín (Santander – Colombia).

4.2. Objetivos específicos

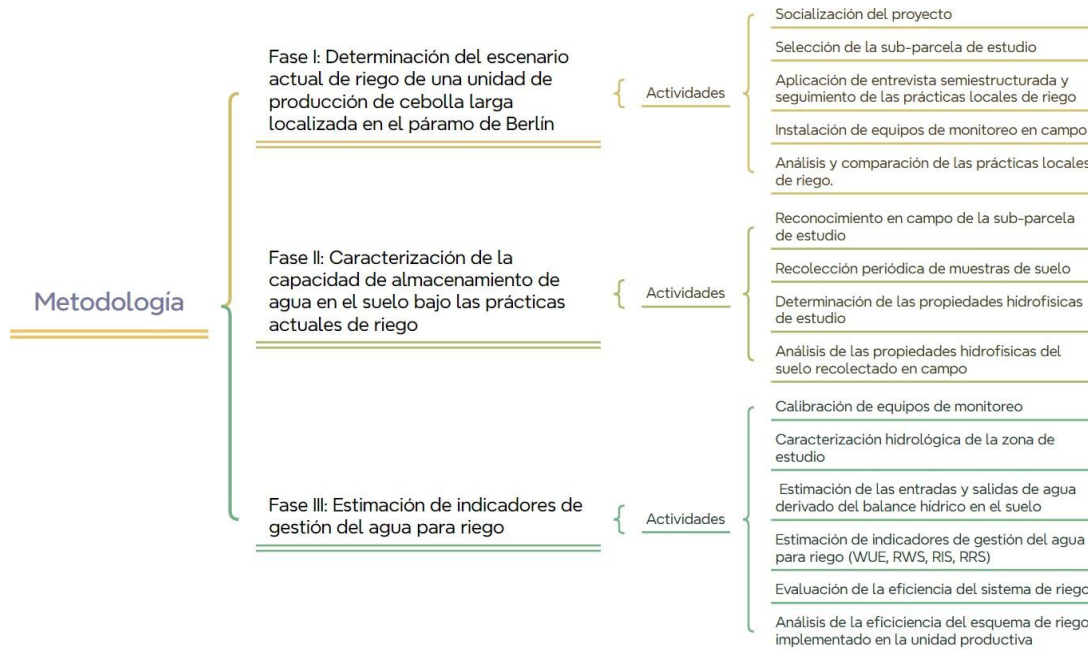
- Determinar el escenario actual de riego de una unidad de producción de cebolla larga localizada en el páramo de Berlín.
- Caracterizar la capacidad de almacenamiento de agua del suelo agrícola de la unidad productiva de estudio de forma indirecta a través de las propiedades hidrofísicas del suelo.
- Estimar indicadores de gestión del agua en el cultivo de cebolla larga del páramo de Berlín para la propuesta de estrategias de gestión integral del recurso hídrico.

5. Metodología

La presente investigación se desarrolló en tres fases metodológicas: i) determinación del escenario actual de riego de una unidad productiva de cebolla larga localizada en el páramo de Berlín – Santander; ii) caracterización de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo bajo las prácticas actuales de riego; y iii) estimación de indicadores de gestión del agua para riego. La Figura 1 presenta un resumen gráfico de la metodología empleada.

Figura 1.

Metodología aplicada a la investigación.



Fuente: Autor

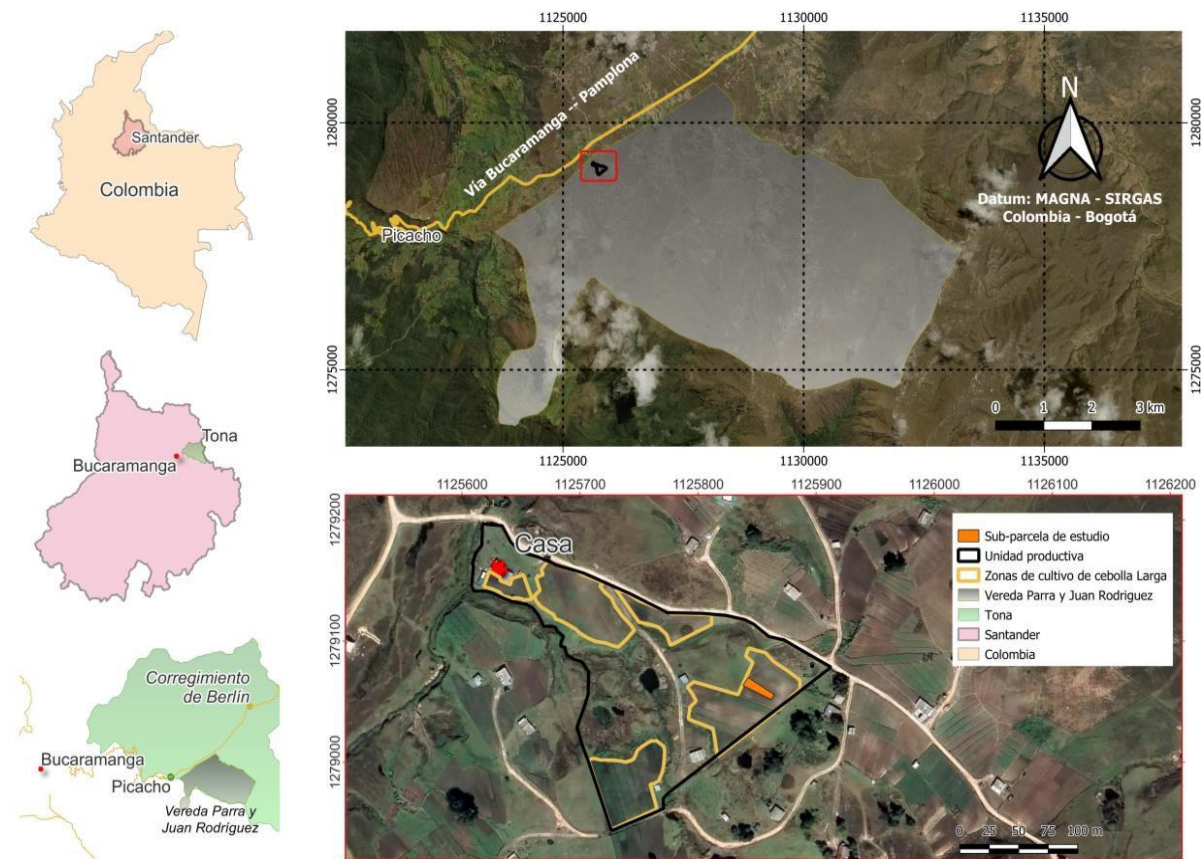
5.1. Zona de estudio

La zona de estudio corresponde a una unidad productiva de cebolla larga situada en la vereda Parra y Juan Rodríguez, en el corregimiento de Berlín, municipio de Tona, Santander (7°07'08.1" N, 72°56'23.0" W), a una altitud de 3,380 msnm, en el km 58 de la vía nacional que conecta Bucaramanga (Santander) con Pamplona (Norte de Santander).

Además, esta zona se encuentra dentro del complejo de páramos Jurisdicciones Santurbán – Berlín (Figura 2), área que actualmente se encuentra dentro de una figura de proyección denominada Distrito de Manejo Integrado (DMI) de los Recursos Naturales Renovables del Páramo de Berlín (Restrepo et al., 2008). La actividad económica principal de la vereda es la agropecuaria, donde aproximadamente el 36% de la población se dedica exclusivamente al cultivo de cebolla larga, seguido por un 16% que se dedica tanto al cultivo de cebolla como a la crianza de ganado ovino y solo un 8% se dedica a la cosecha de cebolla, papa y la crianza de ovejas (Amorocho et al., 2024).

Figura 2.

Mapa de localización de la zona de estudio.



Fuente: Autor.

La unidad productiva de estudio posee un área total de 2.92 ha, de las cuales 1.15 ha están destinadas para la producción permanente de cebolla larga. Adicionalmente, la unidad productiva cuenta con zonas de cultivos de papa en menor proporción. Además del desarrollo de ganadería extensiva (ovinos, bovinos y aves de corral) a pequeña escala, siendo esta actividad destinada principalmente para consumo propio y para el comercio local.

5.2. Fase I: Determinación del escenario actual de riego de una unidad productiva de cebolla larga

5.2.1. Actividades previas

Previo a la selección de la sub-parcela de estudio, se realizaron visitas mensuales a la unidad productiva entre junio de 2022 y octubre de 2023. Estas visitas tenían por objetivo: establecer un vínculo de confianza con el agricultor responsable; llevar a cabo un reconocimiento detallado de la zona y sus alrededores; explicar de manera detallada el proyecto de investigación al agricultor, abarcando sus objetivos, metodología, herramientas, instalación de equipos y los posibles resultados esperados. Además, obtener la autorización por parte del agricultor mediante consentimiento informado; y finalmente, la selección de la sub-parcela de estudio, así como la ubicación e instalación de los equipos de medición.

5.2.2. Selección de la sub-parcela de estudio

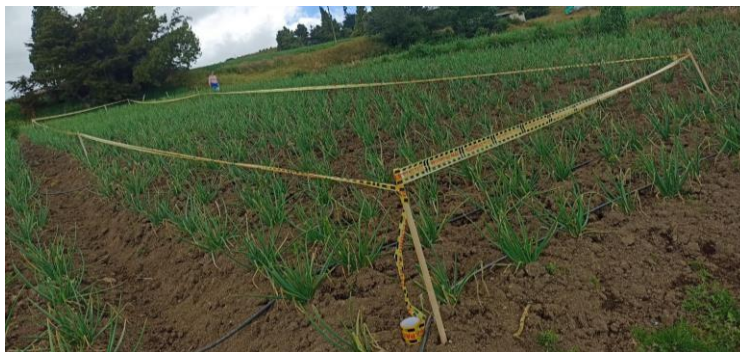
Durante las visitas regulares a la unidad productiva de interés, se identificaron posibles ubicaciones para la sub-parcela de estudio. Los criterios de selección se centraron en encontrar una zona representativa de la unidad, que favoreciera las condiciones óptimas para la investigación sin interferir con las actividades agrícolas cotidianas. Los principales criterios aplicados fueron: i) la sub-parcela debía estar destinada a la producción permanente de cebolla larga; ii) contar con suficiente espacio para la instalación de los equipos de

medición; iii) mantener prácticas agrícolas homogéneas con el resto de la unidad productiva; iv) no estar ubicada en zonas de frontera con otros usos del suelo o cultivos; y v) tener una pendiente uniforme.

Con base en los criterios anteriores, se seleccionó una sub-parcela localizada en la zona sudeste de la unidad productiva, con un área de 211.33 m² (0.021 ha) y una densidad de cultivo de 2.7 plantas/m², con separación promedio de 0.2 m entre plantas y 0.3 m entre surcos (ver Figura 2 y Figura 3).

Figura 3.

Fotografía a detalle de la unidad de muestreo.



Fuente: Autor

5.2.3. Aplicación de entrevista semiestructurada y seguimiento de las prácticas

locales de riego

Con el objetivo de profundizar en las prácticas de riego de la unidad productiva de estudio desde la perspectiva del agricultor, se emplearon herramientas de recolección de información como entrevistas semiestructuradas y formatos observacionales. El cuestionario empleado en la entrevista semiestructurada, compuesto en total por 25 preguntas, abarcó cuatro temas principales (cultivo, suelo y clima, sistema de riego y otros). Además de la entrevista, se elaboró un documento tipo formato observacional para validar y

complementar la información recolectada de la entrevista sobre las prácticas de riego. Este documento incluía aspectos técnicos de la infraestructura de riego, como el tipo de fuente de agua (quebradas, reservorios, tanques), dimensiones de tuberías y accesorios, y detalles del sistema de bombeo (capacidad de la bomba, fuente de energía, condiciones del suelo antes y después del riego). El cuestionario y formato se encuentran en el anexo B y anexo C, respectivamente.

5.2.4. Instalación de equipos de monitoreo en campo

Para el monitoreo de la práctica de riego de la sub-parcela de estudio, se instalaron en total tres equipos: estación meteorológica, sensores de humedad y caudalímetro (Tabla 5). Los sensores de humedad se instalaron dentro de la sub-parcela de estudio a dos profundidades (15 y 30 cm); la estación meteorológica se instaló a 135 metros de la sub-parcela de estudio debido a la falta de espacio dentro de esta. El caudalímetro se instaló en uno de los ramales de las tuberías que abastecen los aspersores de la sub-parcela. Los detalles de las ubicaciones y medidas de protección de los equipos se detallan en las Figuras D1 y D2 (Anexo D).

Tabla 5.*Especificaciones técnicas de los equipos instalados en campo*

Categoría	Modelo	Cantidad	Variable	Resolución	Precisión	Localización
Meteo- rología	WatchDog 2900ET	1	<i>P</i>	0.2 (mm)	± 2 (%)	7°07'06"N 72°56'22"W
			<i>u</i>	1 (Kph)	± 3 (kph)	
			<i>Dv</i>	1 (°)	± 4 (°)	
			<i>T</i>	0.1 (°C)	± 0.6 (°C)	
			<i>Hr</i>	0.1 (%)	± 3 (%)	
			<i>Pr</i>	0.1 (°C)	± 2 (°C)	
			<i>Rs</i>	1 (W/m ²)	± 5 (%)	
Riego	Medidor de chorro Único plástico Clase B/R 80	1	<i>v</i>	0.1 (L)	± 5 (%)	7°07'05.2"N 72°56'17.6"W
	Sensor de humedad del suelo SM150T	2	<i>V</i>	1 mV	± 0.03 m ³ /m ³ entre 0% y 70% entre 0- 60 °C	7°07'06"N 72°56'18"W
			<i>Ω</i>	1 Ω	± 0.5 °C entre 0-40 °C	
	Data logger GPI	1	Registro de datos	-	-	

Nota: P: precipitación; u: velocidad del viento; Dv: dirección del viento; T: temperatura; Hr: Humedad relativa; Pr: Punto de rocío; Rs: Radiación solar; v; volumen de agua; V: voltaje; Ω: resistencia.

5.2.5. Análisis y comparación de las prácticas locales de riego

El análisis de los resultados de la fase I se basó en la comparación de las prácticas actuales de riego con las prácticas documentadas en la literatura consultada en bases de datos científicas y documentos gubernamentales, en donde se buscó si las prácticas realizadas en la unidad productiva de estudio son las adecuadas para el cultivo de interés que en este caso corresponde al cultivo de cebolla larga. Además, si estas prácticas son similares a las desarrolladas en otros ecosistemas de páramo con cultivos de cebolla larga.

5.3. Fase II: Caracterización de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo bajo las prácticas actuales de riego

5.3.1. Reconocimiento en campo de la sub-parcela de estudio

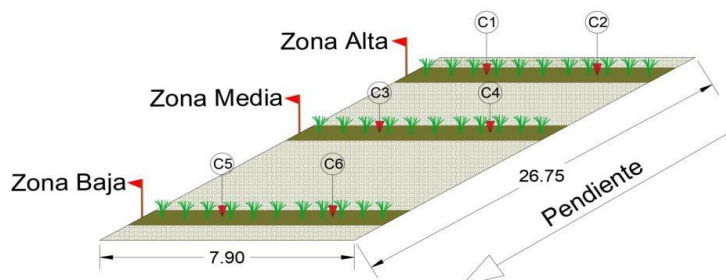
Previo a la actividad de recolección periódica de muestras de suelo, se realizaron recorridos por la sub-parcela de estudio seleccionada con el objetivo de verificar el estado actual del suelo y de los cultivos, topografía del terreno, por último, selección de zonas y profundidades de muestreo. Este procedimiento se realizó con ayuda de equipos de medición como decámetros y sistemas de información geográfica, además se usaron equipos muestreadores como barrenos y palas para identificar las profundidades de los cambios de estrato del suelo, zonas duras, entre otros aspectos.

5.3.2. Recolección periódica de muestras de suelo en campo

Definidas las profundidades de muestreo, se realizaron en total cinco (5) campañas de recolección de muestras de suelo (una por mes) siguiendo un diseño discreto estratificado en profundidad (0-20, 20-40 y 40-60 cm) en tres zonas de la sub-parcela de estudio como se observa en la Figura 4, además las muestras se recolectaron en espacios ubicados entre los surcos de los cultivos de cebolla larga.

Figura 4.

Esquema de las zonas de recolección de las muestras de suelo de la sub-parcela de estudio.



Nota: Dimensiones del diagrama en metros

Fuente: Autor.

La designación de las zonas de muestreo, se basó en la división del área en tres zonas: alta, media y baja (Figura 4), utilizando bastones indicativos para facilitar su ubicación. Para el caso de las propiedades de densidad aparente, humedad y porosidad se tomaron muestras inalteradas de suelo, en donde se asumió un punto de muestreo como representativo de cada una de las zonas. En el caso de las propiedades de densidad real, constantes de humedad y textura (arena, limo y arcilla), se tomaron muestras inalteradas, en donde se asumió como un único muestreo como representativo de la sub-parcela de estudio. Por otro lado, para las propiedades de pH, conductividad eléctrica, y contenido de carbono orgánico, se tomaron dos muestras alteradas por zona de muestreo. Las tablas 6 y 7 resumen el plan de muestreo realizado en la presente investigación y los ensayos realizados para cada una de las propiedades de interés.

Tabla 6.

Plan de muestreo de suelo.

Profundidad (cm)	Frecuencia	Propiedades analizadas	Tipo de muestra	Total de muestras
Superficial	Una sola vez al inicio del período de monitoreo	Tasa de infiltración	Campo	1
		Conductividad hidráulica saturada	Campo	1
0-20	Una sola vez al inicio del período de monitoreo	Constantes de humedad del suelo	Inalterada	9
20 – 40		Densidad Real	Inalterada	9
40 – 60		Textura	Alterada	18
0-20 20 – 40 40 – 60	Mensual	Densidad aparente	Inalterada	45
		Humedad	Inalterada	45
		Porosidad	Inalterada	45
		pH	Alterada	90
		Conductividad eléctrica	Alterada	90
		Contenido de carbono orgánico	Alterada	90

Fuente: Autor.

Tabla 7.

Ensayos para la determinación de las propiedades hidrofísicas de las muestras de suelo extraídas.

Profundidad (cm)	Propiedad	Ensayo	Norma
0-20 20-40 40-60	Textura	Bouyoucus – Day Modificado	NTC 6299 (NTC, 2018)
	Densidad aparente	Relaciones gravimétricas	ASTM D7263-21 (ASTM, 2009)
	Densidad real	Picnómetro	ASTM D854-14 (ASTM, 2014)
	Contenido de humedad	Relaciones gravimétricas	ASTM D2216-10 (ASTM, 2005)
	Porosidad	Relaciones gravimétricas	ASTM F1815-11 (ASTM, 2018b)
	Curva de retención de humedad	Platos de presión de Richard	(Klute, 1982)
	Contenido de carbono orgánico oxidable	Método de Walkley – Black	ASTM F1647-11 (ASTM, 2011)
	Contenido de materia orgánica del suelo	Cuantificado por medio del factor de Van Bemmelen con un valor de 1.724	ASTM F1647-11 (ASTM, 2011)
	pH	Potenciómetro en relación suelo-agua 1:1	ASTM D4972-18 (ASTM, 2001)
	Conductividad eléctrica	Potenciómetro en relación suelo-agua 1:5	ISO 11265 (ISO, 1994)
Superficial	Conductividad hidráulica saturada	Modelo Kostiakov	-
	Tasa de infiltración	Infiltrómetro de doble anillo	ASTM D3385-18 (ASTM, 2018a)

Fuente: Autor.

La recolección de las muestras inalteradas de suelo se realizó por medio de anillos metálicos de pared delgada de 100 cm³ tipo Kopecky, destinados para la caracterización de propiedades como: contantes de humedad, Da, Pr, Hm y Dr. Por otro lado, para la recolección de las muestras alteradas de suelo se empleó el uso de un barreno tipo holandés, para posteriormente caracterizar las demás propiedades de estudio (pH, conductividad eléctrica,

cantidad de materia orgánica y textura). Las muestras de suelo alteradas e inalteradas se conservaron en bolsas plásticas herméticas debidamente etiquetadas y almacenadas en condiciones de frío. Posteriormente, se transportaron en cavas plásticas, siguiendo las recomendaciones establecidas en la guía de recolección de muestras de suelo del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (IGAC, 2006).

5.3.3. Determinación de las propiedades hidrofísicas de estudio

Las propiedades hidrofísicas del suelo recolectado de la zona de estudio se determinaron de acuerdo con los procedimientos establecidos en los siguientes documentos: Métodos analíticos de laboratorio de suelos (IGAC, 2006), Norma Técnica Colombiana (NTC) y la “*American Society for Testing Materials*” (ASTM). En la Tabla 7 se presentan los métodos para cada uno de los ensayos necesarios para la estimación de las propiedades hidrofísicas del suelo.

Todos los análisis de las propiedades hidrofísicas del suelo se realizaron por triplicado en el Laboratorio del grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander (UIS). La determinación del contenido de carbono orgánico del suelo, densidad real, textura y la curva de retención de humedad se llevaron a cabo en el laboratorio del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

5.3.4. Análisis de las propiedades hidrofísicas del suelo recolectado en campo

Con la finalidad de caracterizar la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo bajo las prácticas actuales de riego, se aplicaron análisis estadísticos, con el objetivo de identificar si existen diferencias significativas en el tiempo y en profundidad de las propiedades hidrofísicas del suelo de estudio. Todas las pruebas se realizaron con un nivel de

significancia del 5%. Además, los diferentes análisis estadísticos y/o gráficos se realizaron mediante el uso del software libre Python (Python, s. f.). A continuación, se mencionan los análisis realizados:

Se realizó un análisis estadístico descriptivo de las propiedades hidrofísicas del suelo, evaluando medidas de tendencia central (media, mediana y moda), de dispersión (desviación estándar, varianza y rango intercuartil) y coeficientes adimensionales como el coeficiente de variación. Para verificar la normalidad, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk a cada conjunto de datos. En los casos en que los datos no mostraron distribución normal, se utilizó la prueba no paramétrica de Mann-Whitney para detectar diferencias significativas entre puntos y zonas de muestreo. Para datos con distribución normal, se aplicó la prueba t de Student para evaluar diferencias entre dos zonas de muestreo, y un análisis de varianza (ANOVA) para examinar diferencias significativas entre varios grupos. Como alternativa no paramétrica para datos no normales, se empleó la prueba de Kruskal-Wallis. Para analizar variaciones temporales de las propiedades del suelo, se implementó un ANOVA de medidas repetidas en las propiedades con distribución normal y la prueba de Friedman en casos no paramétricos. Finalmente, se aplicaron análisis post hoc: el test de Dunn como alternativa no paramétrica y el test de Tukey para datos que cumplieron la distribución normal, permitiendo identificar qué medias o medianas diferían significativamente y cuantificar el grado de diferencia mediante el valor p.

5.4. Fase III: Estimación de indicadores de gestión del agua en la agricultura

5.4.1. Estimación de las entradas y salidas de agua derivado del balance hídrico en el suelo.

Con la finalidad de estimar las entradas y salidas de agua a escala diaria, semanal y mensual en el suelo cultivado con cebolla larga en la unidad productiva de estudio, y posteriormente estimar los indicadores de gestión de agua para riego, se empleó la ecuación general del balance hídrico (ecuación 10) adaptada a las condiciones de lugar y a la información disponible.

$$\frac{ds}{dt} = P + R - ET_c - L \quad (10)$$

donde $\frac{ds}{dt}$: Variación de la humedad en el tiempo (mm); P: Precipitación de la zona (mm); L: salidas de agua del sistema (mm); ET_c : Evapotranspiración del cultivo (mm); R: Lámina de riego (mm).

Los términos de P y de ds/dt de la ecuación 10, se estimaron mediante la recolección de los datos continuos de la estación meteorológica y del sensor de humedad respectivamente. La cuantificación del requerimiento hídrico del cultivo de cebolla larga (ET_c) se estimó siguiendo la metodología presentada por la guía FAO No. 56 (Allen et al., 2006), la cual requiere determinar previamente la ET_o con base en las condiciones climáticas de la zona y el valor K_c del cultivo de interés. El cálculo de la ET_o se realizó con los datos meteorológicos a nivel diario de la estación meteorológica instalada previamente dentro de la zona de estudio y la ecuación de P-M (ecuación 1), el valor del K_c seleccionado fue tomado para el cultivo de cebolla verde de la guía FAO No. 56, el cual corresponde a un valor de uno

para la fase de desarrollo y fin de temporada.

La estimación de la lámina de riego aplicada a la subparcela de estudio se estimó mediante el uso de los sensores de humedad del suelo, que permitieron registrar el tiempo de riego por medio de la identificación de los eventos donde se registró un aumento de la humedad del suelo en ausencia de precipitación. Además, con la ayuda del caudalímetro instalado se midió el caudal del aspersor de estudio, considerando el caudal de operación como el promedio de todas las mediciones realizadas. Posteriormente, se cuantificó la lámina de agua aplicada multiplicando el caudal promedio del aspersor por el tiempo de operación y dividiendo el resultado entre el área de aplicación (Hamid Ahmadi et al., 2024) (ecuación 11).

$$R = \frac{Q_{prom} * T}{S_m * S_l} \quad (11)$$

donde R = lámina de riego aplicada (mm); Q_{prom} = Caudal promedio del aspersor (L/min); T = tiempo de duración de riego estimado a partir del aumento gradual de la humedad del suelo en ausencia de precipitación (min); S_m = distancia de separación entre los aspersores (m); por último, S_l = distancia lateral de la sub-parcela de estudio (m).

Para el uso de los datos de P y de ds/dt a escala diaria, semanal y mensual en la ecuación 10, se requirió previamente un proceso de calibración del sensor de humedad y validación de la información meteorológica de la zona, procesos que se describen a continuación:

- **Calibración sensor de humedad**

Los sensores SM150T miden indirectamente la humedad volumétrica del suelo (θ) detectando las propiedades dieléctricas del suelo húmedo, como la permitividad (ϵ) o el

índice de refracción. Este proceso se realiza mediante la aplicación de energía eléctrica desde un datalogger hasta las agujas del sensor, creando un campo electromagnético de 100 MHz. Para un tipo particular de suelo, el índice de refracción se considera constante y sólo varía con el contenido de agua. La calibración del sensor de humedad se realizó siguiendo dos metodologías, una de ellas propuestas por el fabricante Delta-T Device y otra propuesta por Holzman et al. (2017) y adaptada por Gómez (2022) en suelos de páramos. Los detalles del procedimiento de calibración para las dos metodologías mencionadas anteriormente se encuentran en el Anexo E.

- **Caracterización y validación de la información hidrológica de la zona de estudio**

Durante el período comprendido entre las fechas del 20 de septiembre de 2023 y el 30 de abril de 2024, se llevó registro de las variables climáticas en la zona de estudio con una frecuencia de 15 minutos, mediante la estación meteorológica previamente instalada. Se efectuaron descargas de datos cada 15 días con el propósito de mitigar posibles pérdidas de información y revisar periódicamente el estado del equipo. Posterior a las descargas de datos, se realizaron análisis de las variables climáticas (ver Tabla 5) a nivel horario, diario y mensual, con la finalidad de observar el comportamiento climático de la zona durante el tiempo de estudio, además de identificar posibles errores en los datos. El proceso de caracterización y validación de la información meteorológica se realizó con ayuda de estaciones IDEAM cercanas como “Picacho” (7°06'35.9"N 72°57'59.5"W) y “Berlín” (7°11'12.7"N 72°52'06.5"W), junto con la estación GPH UIS (7°06'17.0"N 72°56'42.8"W).

5.4.2. Estimación de los indicadores de gestión del agua para la agricultura (RWS, RIS, RRS)

La estimación de los indicadores de gestión del agua para la agricultura se realizó con base en la metodología planteada por Molden et al. (1998) y los datos presentados en la Tabla 2. Los indicadores de RIS, RWS y RRS fueron calculados mediante las ecuaciones 4, 5 y 6, respectivamente, tal como se presentaron previamente. Estos indicadores fueron estimados a nivel semanal con el fin de analizar el desarrollo de la gestión del agua para riego en la unidad productiva de interés, identificando periodos de escasos de agua o exceso de riego. La lámina de Pe se determinó mediante la diferencia de humedad del suelo antes y después de un evento de precipitación (ecuación 3), los datos de precipitación y de humedad del suelo se tomaron de las estaciones de monitoreo previamente instaladas.

5.4.3. Estimación de los indicadores de eficiencia del sistema de riego (CUC, CUD, WDEL)

La evaluación de la eficiencia del sistema de riego en la zona de estudio se desarrolló por medio de los indicadores CU, CUD, WDEL, los cuales fueron calculados mediante las ecuaciones 7, 8 y 9. El proceso de evaluación consistió en los siguientes pasos:

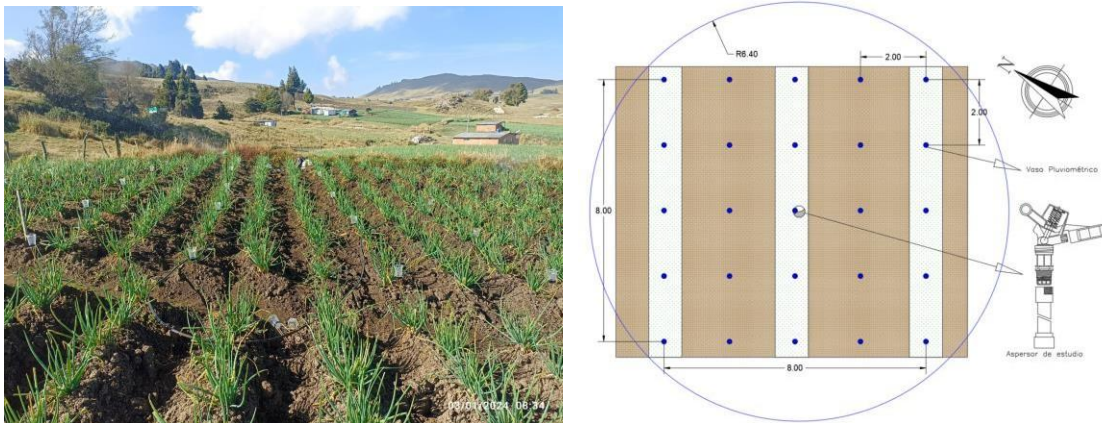
- I. Instalación de la matriz de vasos pluviométricos en un área de 8 x 8 m, separados dos metros entre ellos alrededor del aspersor de evaluación (Figura 5).
- II. Medición de la separación entre aspersores y el radio húmedo de estos.
- III. Medición de la presión de salida de agua del aspersor por medio de un manómetro de glicerina (Figura 6a).
- IV. Medición del caudal de aplicación del aspersor mediante el caudalímetro instalado previamente dentro de la sub-parcela de estudio, como se observa en la Figura 6b.

- V. Registro del volumen de agua captado por los vasos pluviométricos durante la evaluación mediante el uso de una probeta graduada en mililitros (Figura 6c).
- VI. Descarga de datos del registro de velocidad y dirección del viento, temperatura y radiación solar de la zona con un intervalo de tiempo de cada 15 minutos de la estación meteorológica instalada en la zona.

Los vasos pluviométricos empleados poseen dimensiones de 12.5 cm de alto, con 5.5 y 8.5 cm de diámetro inferior y superior respectivamente, con un volumen total de 0.48 litros, cumpliendo con las recomendaciones de la Norma Española (UNE) 318001 (UNE, 2017). Debido a las irregularidades del terreno, se tomó como precaución la instalación de los vasos pluviométricos sobre un soporte de 15 cm de altura con respecto al suelo, para evitar posibles derrames del agua y garantizar uniformidad en la altura de los vasos. La Figura 5 presenta un esquema de la instalación de los vasos pluviométricos en la sub-parcela de estudio. Además, el formato de evaluación utilizado para las pruebas de la eficiencia del sistema de riego utilizado se presenta en el Anexo F.

Figura 5.

Esquema de distribución de los vasos pluviométricos en la sub-parcela de estudio.



Fuente: Autor

Para estimar el volumen de agua evaporada por acción de la radiación solar durante el periodo de evaluación, se midió mediante el uso de una probeta graduada al mililitro la diferencia del volumen de agua antes y después de la evaluación de tres recipientes plásticos similares a los vasos pluviométricos empleados en la evaluación de la eficacia del sistema de riego. Posteriormente este volumen de agua evaporado se sumó al valor registrado por los vasos pluviométricos utilizados en la evaluación. La metodología presentada anteriormente se basó en el estudio realizado por (Faryabi et al., 2020; Flórez et al., 2013). Por último, la duración de la evaluación consistió en el tiempo normal que el agricultor destina para su actividad de riego, la cual fue entre los 120 - 180 minutos.

Figura 6.

Elementos para la evaluación de la eficiencia del sistema de riego implementado.



Nota: A) Manómetro de glicerina; B) Caudalímetro; C) Probeta
Fuente: Autor

5.4.4. Análisis de la eficiencia del sistema de riego implementado en la unidad productiva

La información recopilada y procesada se organizó y resumió en tablas para posteriormente comparar las diferencias entre las magnitudes de las entradas y salidas de agua del suelo de la sub-parcela de estudio, con el objetivo de cuantificar la eficiencia del uso del agua mediante indicadores de gestión del agua para riego. Los coeficientes CU, CUD

y WDEL obtenidos de las evaluaciones del sistema de riego se relacionaron con las variables medidas en campo para cada evaluación (velocidad del viento, presión, temperatura), con el propósito de identificar los factores que más afectan la eficiencia del sistema y proponer soluciones a esta problemática. El análisis de los datos, que incluyó la cuantificación de magnitudes y la creación de gráficos, se realizó utilizando el software Python.

Finalmente, los indicadores de gestión del agua para la agricultura (RIS, RWS, RRS) se compararon con indicadores publicados en fuentes científicas para ecosistemas y sistemas de riego similares, proporcionando un contexto más amplio y permitiendo evaluar el desempeño del sistema de riego en relación con otros estudios, así como identificar posibles alternativas de mejora.

6. Resultados y Discusión

6.1. Determinación del escenario actual de riego de una unidad productiva de cebolla larga

En la presente sección se presentan los resultados de: i) descripción de las prácticas agrícolas observadas en la zona de estudio, ii) entrevista semiestructurada y seguimiento de las prácticas agrícolas con relación al riego.

6.1.1. Descripción de las prácticas agrícolas de la zona

Las prácticas agrícolas de la zona de estudio se caracterizan por ser tradicionales, empleando principalmente mano de obra familiar o local. Además, poseen una dependencia del ecosistema local y de insumos externos (p.ej., agroquímicos convencionales, pollinaza, cal, etc.). Su escala de producción es pequeña y desarrollan tecnologías propias, adaptadas a las condiciones locales. A continuación, se detallan las prácticas observadas durante el periodo de seguimiento.

Preparación del terreno: entre las actividades de preparación del suelo realizadas en la zona, se encuentra la labranza, la cual consiste en la actividad de generar en el suelo condiciones adecuadas para el flujo de agua y el aire, evitar la formación de capas duras de suelo que limitan la penetración y el crecimiento de las raíces de los cultivos, además de permitir la incorporación de residuos vegetales y de fertilizantes y/o herbicidas (Sánchez et al., 2012). En la unidad productiva de estudio, se observó que la labranza mecanizada (motocultor) se realiza comúnmente como una etapa inicial en la preparación del suelo para la siembra de cebolla, específicamente para la definición de surcos y camellones. Sin embargo, esta práctica también se lleva a cabo, en ocasiones especiales debido al esfuerzo físico y requerimiento de maquinaria agrícola, cuando el agricultor percibe que el

suelo está demasiado compactado o presenta costras en su capa superior, o cuando es necesario renovar surcos, camellones y pasos peatonales que facilitan el drenaje del agua.

Fertilización: la fertilización se realiza para suplir las necesidades nutricionales del cultivo y compensar la extracción de nutrientes que se generan en el suelo por acción de la cosecha, u otras causas (Huertas et al., 2020). En la unidad productiva, esta actividad se realiza de manera intuitiva, como es tradicional en los cultivos artesanales. Principalmente se emplean abonos orgánicos como pollinaza o gallinaza, sin ningún tratamiento previo. La fertilización suele realizarse después de la cosecha, al inicio de la nueva siembra, con el objetivo de mejorar el crecimiento de la próxima cosecha. Sin embargo, la realización de esta actividad sin asesoramiento técnico puede generar efectos negativos en el medio ambiente, debido a la facilidad con la que los nutrientes se pueden perder por lixiviación (Rey-Romero et al., 2022).

Control de plagas y enfermedades: durante el periodo de estudio, se observó la presencia persistente de plagas, especialmente babosas, que se alimentan del tejido vegetal tierno de la cebolla y contaminan las hojas con su excremento, afectando la calidad del cultivo (Sánchez et al., 2012). La presencia de esta plaga se debe a varios factores que dificultan su control, como, por ejemplo: la falta de rotación de cultivos, alta densidad de siembra y humedad del suelo por efectos del riego, fuerte olor de los fertilizantes orgánicos no tratados y de los desechos de cosechas anteriores, que atraen a diversas especies de insectos (Huertas et al., 2020; Pinzón, 2004; Sánchez et al., 2012).

Se observó en la zona, que el control de las plagas y enfermedades usualmente se controla mediante el uso plaguicidas comerciales, similar a lo reportado con la investigación de Barrera & Bautista (2022). No obstante, durante el período de seguimiento de las prácticas,

se continuó observando la presencia de esta plaga. Una solución alternativa observada fue la eliminación manual de la plaga y de los cultivos afectados durante el proceso de postcosecha.

Cosecha y postcosecha: La cosecha del cultivo de cebolla larga está determinada por el índice de madurez, que corresponde al número de días transcurridos desde la cosecha anterior. Este período generalmente es alrededor de los tres meses (Huertas et al., 2020). Sin embargo, en algunos casos, el agricultor de la zona de estudio decide demorar la cosecha debido a la falta de personal o a los bajos precios del mercado de la cebolla larga. La cosecha se realiza principalmente de manera manual con herramientas tipo azadón. Posteriormente, es transportada a bodegas donde es limpiada y clasificada de manera manual, y luego se ata colocando los gajos en un solo sentido hasta alcanzar un peso aproximado de 32 kilos, para finalmente ser cargada en camiones y ser comercializada en las centrales de abasto.

Es importante señalar que el proceso de limpieza de la cebolla varía según su destino. Para sectores cercanos a Berlín, como Bucaramanga y Cúcuta, la cebolla es limpiada debido a que se comercializa el día siguiente. En cambio, para destinos más lejanos, como Antioquia o la Costa Colombiana, la cebolla no se limpia, ya que los comerciantes y agricultores comentan que la capa exterior removida en el proceso de limpieza ofrece una protección al cultivo durante el viaje además de evitar la pérdida de agua.

6.1.2. Seguimiento de las prácticas locales de riego

Se realizó un seguimiento de las prácticas de riego en una unidad productiva de cebolla larga, abarcando la precipitación, los equipos de riego, fuentes de agua como lagos y quebradas cercanas. Este monitoreo permitió evaluar el uso actual del agua y el funcionamiento de los sistemas de riego, identificando problemáticas en la gestión hídrica y

e ineficiencia del riego. A continuación, se presentan los principales hallazgos obtenidos de las visitas técnicas realizadas:

- ***Fuentes hídricas***

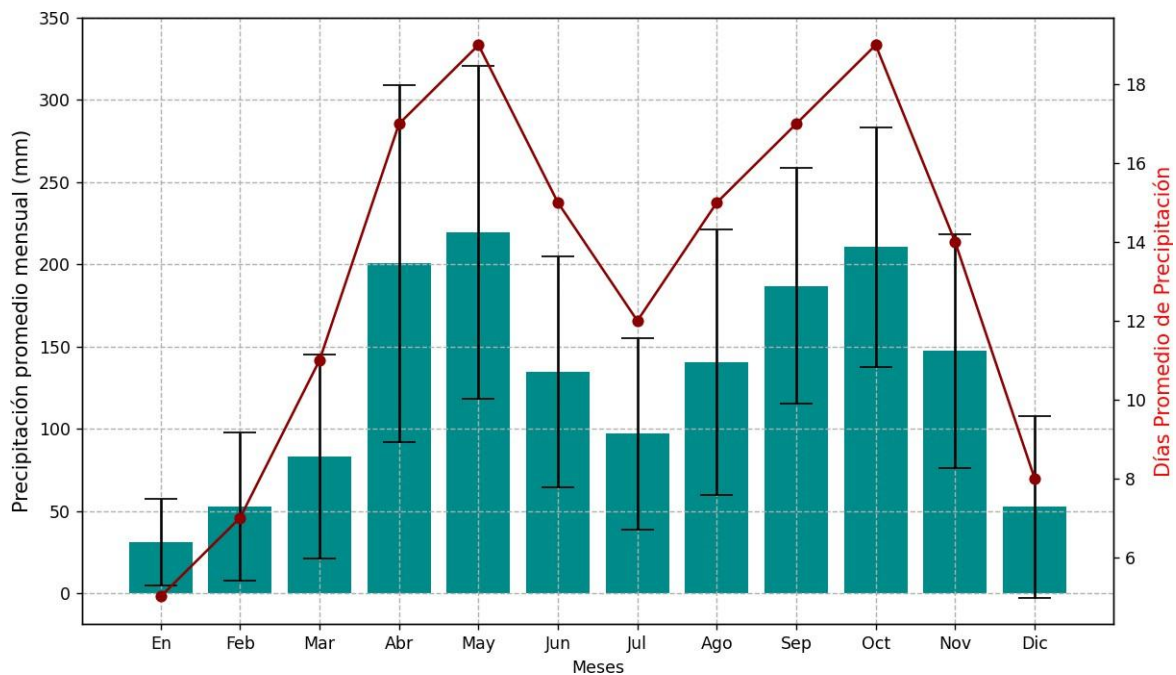
Precipitación: La principal fuente hídrica que dispone el cultivo de cebolla larga en la zona corresponde a la precipitación local. Con base en los datos de precipitación de la estación IDEAM “*Picacho*” (Latitud 7°06’35.4”N y Longitud 72°57’59.8”W), la precipitación es de comportamiento bimodal (Figura 7) característico de los páramos ubicados en la cordillera oriental (Mosquera et al., 2023), en donde se presentan dos períodos de alta precipitación, que en la zona de estudio corresponde a los meses de marzo a mayo y de septiembre a noviembre, alternando con dos períodos de baja precipitación: de diciembre a febrero y de junio a agosto (Patiño-Gutiérrez et al., 2024). Además, se observó que los meses más lluviosos del año suelen ser en mayo y octubre (aproximadamente 19 días), mientras que enero y febrero son los meses con menos días lluviosos (menos de 10 días).

Aunque la precipitación media anual de la zona es de aproximadamente 1300 mm/año con base a la estación IDEAM “*Picacho*”, este suministro hídrico no es uniforme, con base al resultado de la entrevista semiestructurada y al seguimiento de las prácticas de riego, el agricultor mencionó repetidas veces que “*cada verano es más fuerte que el anterior*”. Esto haciendo alusión de que cada año las precipitaciones durante la temporada de sequías son menores, causando que dependa de las otras fuentes hídricas que dispone en la unidad productiva. Sumado a que los patrones de lluvias no son consistentes debido a la aleatoriedad climática, lo que dificulta la capacidad de predecir los periodos de sequías y de lluvias. Además, ellos aseguran que en los últimos años se ha venido presentado “*reducciones en las*

precipitaciones de la zona”. Comentarios que son similares a otros agricultores de la misma zona (verdea de Parra y Juan Rodríguez), los cuales comparten la misma percepción de la difícil predicción de las temporadas de lluvias y sequías (Amorocho et al., 2024).

Figura 7.

Precipitación media mensual multianual y promedio de días de precipitación mensual entre 1968 - 2023 según la estación IDEAM Picacho.

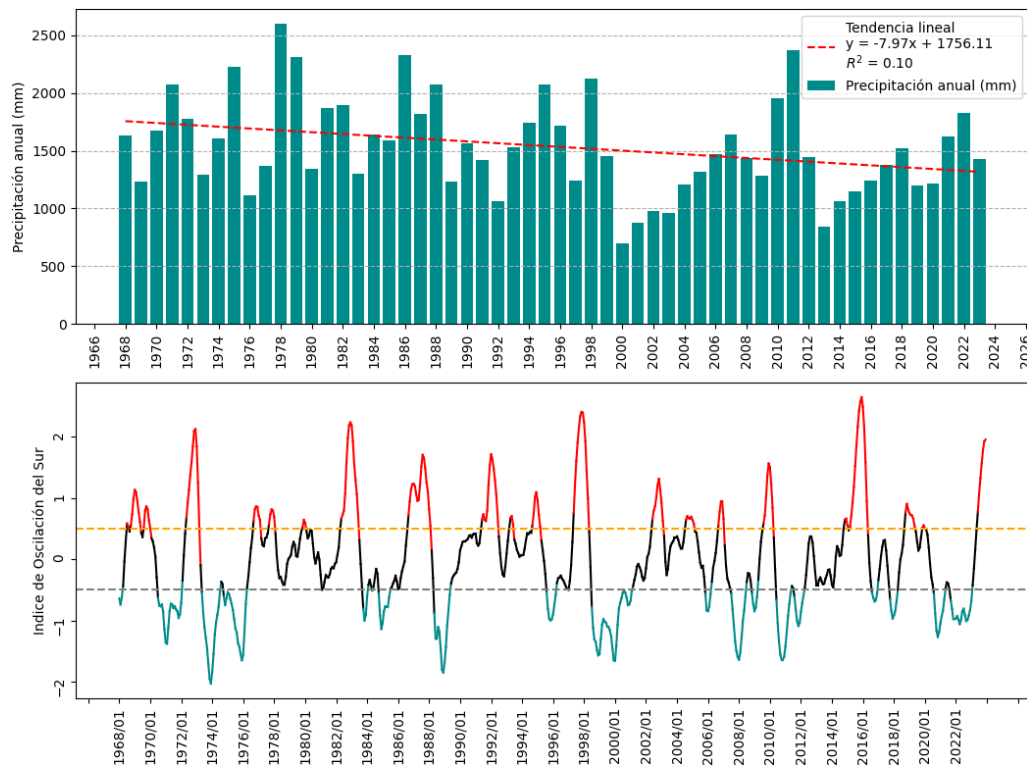


Adaptado de: (IDEAM, 2024).

Los comentarios mencionados anteriormente se verificaron con la ayuda de la estación meteorológica “*Picacho*”, la cual confirma la percepción de los agricultores de la zona. La Figura 8 presenta la precipitación total anual entre los años 1968 y 2023, además de la variación del índice Oceánico de El Niño (ONI) para el mismo periodo de tiempo, en donde valores de ONI mayores a +0.5 indican periodos de fenómeno del niño (periodos de altas temperaturas y sequías) y valores menores a – 0.5 indican periodos de fenómeno de la niña (periodos de altas precipitaciones).

Figura 8.

Variación de la precipitación anual estación IDEAM Picacho entre los años 1967 – 2023.



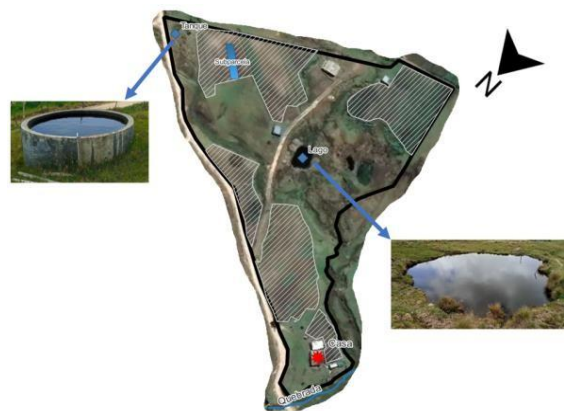
Adaptado de: IDEAM

La percepción mencionada por los agricultores de la zona de estudio parece ser consistente con los resultados de la investigación de Leroy (2019), desarrollada en tres zonas agrícolas localizadas en los páramos de los municipios de Urdaneta, Rangel (Venezuela) y Aquitania (Colombia). En este estudio, se investigó la percepción de los agricultores ante la escasez de agua en el contexto del cambio climático. Los resultados mostraron que el 36.6% de los agricultores entrevistados en las tres zonas asociaban la escasez de agua con las temporadas de sequías, seguido por un aumento en la demanda de agua (14.5%). Además, el 18.3% de los encuestados mencionan que las sequías son cada vez más largas y calurosas, esto haciendo alusión a la alteración de las estaciones.

Reservorios: Seguido de la precipitación local, se encontró que la siguiente fuente de suministro hídrico para el cultivo de cebolla larga corresponde a un lago natural ubicado entre las subparcelas de cultivo, como se muestra en la Figura 9. Además del lago, el agricultor dispone de dos fuentes de agua adicionales: un pequeño tanque de reserva en la parte superior de la unidad productiva y una quebrada en la parte inferior (Figura 9) con un caudal estimado en el 2020 de 23.70 ± 4.75 y 48.45 ± 8.40 l/s para las temporadas de sequías y de lluvias, respectivamente (Rey-Romero et al., 2022). Sin embargo, estas fuentes hídricas adicionales se emplean con poca frecuencia debido a las siguientes razones: i) el tanque superior no cuenta con la altura suficiente para proporcionar una presión adecuada para los sistemas de riego por aspersión; ii) la quebrada cercana se encuentra en la parte baja de la unidad productiva, de manera que se requiere de un sistema de bombeo para transportar el agua, por lo que el agricultor evita su uso debido a los altos costos de energía eléctrica asociados al uso de la bomba. Por lo tanto, esta fuente hídrica solo se emplea en temporadas de sequías intensas y con el propósito de llenar el lago principal. Por último, el lago auxiliar se emplea para regar la parcela cultivada localizada en la zona suroccidental de la unidad productiva.

Figura 9.

Fuentes hídricas disponibles de la unidad productiva de estudio



Fuente: Autor

El lago principal es alimentado principalmente por la precipitación durante las temporadas de lluvias y sequías moderadas, así como de pequeños flujos subsuperficiales generados por la escorrentía. Sin embargo, durante el seguimiento de las prácticas agrícolas se observó que, en algunos meses, especialmente durante los meses secos, el nivel del lago descendió considerablemente, además de presentarse posibles problemas como eutrofización y altos niveles de sólidos suspendidos en comparación con los meses lluviosos, como se puede apreciar en la Figura 10. Con base a la investigación de Rey-Romero et al. (2022) realizada en cercanías de la zona de estudio, esta problemática puede atribuirse al transporte de nutrientes (fertilizantes orgánicos y de síntesis) en forma de escorrentía o lixiviación, producto de la precipitación o de un riego inadecuado. Además, que en la zona circundante del lago se encontró la presencia de ganado extensivo junto con sus excrementos, lo que, en conjunto con el abono basado en el estiércol de pollo, se sugiere la posible sospecha de altos valores de *Escherichia coli*.

Figura 10.

Lago principal de la unidad productiva de estudio en temporada de lluvias y de sequía.



Fuente: Autor

Tomando en consideración que la sub-parcela de estudio se encuentra en mayor altitud que el lago principal, existe la posibilidad de que en eventos de alta precipitación o de riego, cuando el suelo esté completamente saturado, una proporción de los nutrientes de los

abonos orgánicos e inorgánicos se transporten en forma de escorrentía superficial al lago principal, de forma que nuevamente los nutrientes retornen al cultivo, pero esta vez diluidos en el agua de riego. Lo cual podría ser beneficioso para los cultivos; sin embargo, esto puede requerir ajustes en la dosificación de los fertilizantes (Rey-Romero et al., 2022). Además, puede ocasionar posibles afectaciones, como la reducción de la productividad debido al aumento de la salinidad del suelo, lo que incrementa el potencial osmótico y dificulta la absorción de agua por parte de las raíces (INIA, 2017). No obstante, para confirmar las hipótesis planteadas anteriormente es necesario realizar una investigación adicional.

- *Sistema de riego*

El sistema de riego adoptado en la unidad productiva de estudio es por aspersión, el cual es ampliamente recomendado para cultivos a nivel mundial debido a que se asemeja a la precipitación, además de sus múltiples ventajas: mayor uniformidad en la distribución del agua; reducción en las pérdidas de agua como el escurrimiento superficial; mejora en la programación del riego y la entrega oportuna de agua de riego para satisfacer las demandas hídricas del cultivo en etapas específicas de desarrollo. Por último, el riego por aspersión se adapta fácilmente a diferentes topografías y permite cubrir grandes áreas cultivadas (Hamid Ahmadi et al., 2024) y es el más empleado en los ecosistemas de páramo colombianos (Gutiérrez-Malaxechebarría, 2013).

El sistema de distribución de riego de la unidad productiva es de tipo ramificado y se compone de tuberías fabricadas en polietileno. El agua es conducida desde la bomba hasta una tubería principal de 2” de diámetro que posteriormente conduce el agua a las tuberías de distribución cercanas a las sub-parcelas. Posteriormente, el flujo se deriva mediante

conexiones tipo T para alimentar las tuberías secundarias de ½” de diámetro, que finalmente suministran agua a cada uno de los aspersores. El sistema de riego implementado opera con 14 aspersores en simultáneo.

Durante las visitas al campo, se observó que el agricultor cuenta únicamente con una bomba para toda la unidad productiva, lo que dificulta la práctica de riego, ya que se deben realizar turnos entre las cinco subparcelas que componen la unidad para el suministro hídrico. Además, dispone de un total de 16 juegos de aspersores (14 en operación y dos de repuesto), lo que significa que cada vez que realiza la actividad de riego, el agricultor debe desplazar manualmente el conjunto de mangueras y aspersores. Adicional a las problemáticas mencionadas anteriormente, el agricultor en múltiples ocasiones mencionó que el costo de la energía aumentaba en relación con el uso de la bomba, de manera que, él prefería usar la bomba solo cuando se presentaban periodos de una semana sin lluvias, lo cual puede generar afectaciones al cultivo debido a una práctica de riego que desconoce el estado de humedad del suelo y la demanda de agua del cultivo en forma de ETc.

La molestia del agricultor hacia los altos costos de energía asociados al uso del sistema de bombeo es una problemática común en otras unidades productivas de cebolla larga. Se encontró en literatura que los agricultores de cebolla larga en la laguna de Tota invierten en promedio USD \$102 mensuales por el pago del consumo energético de los sistemas de bombeo (Rodríguez-Robayo et al., 2022). Esto reduce las ganancias netas de la actividad, de manera que los agricultores han optado por algunas alternativas de solución a estos altos costos, como, por ejemplo: reducir el uso de la motobomba, lo que resulta en una menor frecuencia de riego para los cultivos, adopción de energías alternativas, siendo la energía solar la opción predominante, o el uso de tanques elevados (Leroy, 2019). Para el

caso de la unidad productiva de estudio, el agricultor comentó que él paga en promedio entre USD \$ 200 – 150 mensual de electricidad debido al uso de la bomba.

Continuando con el sistema de riego, durante las visitas a campo se observó una heterogeneidad en los modelos de los aspersores empleados, como se muestra en la Figura 11. Se registró el uso de aspersores de impacto con una y dos boquillas, fabricados en materiales metálicos y plásticos, así como aspersores del tipo Wobbler en donde estos operan con diferentes condiciones (Tabla 8). Adicionalmente, varios de estos aspersores ya cuentan con daños en sus componentes (boquillas, resorte, brazo de impacto, entre otros). De manera que, durante la ejecución del riego, no se garantiza una uniformidad en la aplicación del suministro hídrico, reduciendo la eficiencia del sistema de riego.

Figura 11.

Tipos de aspersores presentes en la unidad productiva.



Fuente: Autor

Tabla 8.

Especificaciones de operación aspersores en uso de la unidad productiva.

Modelo	Caudal (Litros por hora)	Presión (kPa)
Aspersor de impacto una boquilla	191 – 270	172 - 345
Aspersor de boquilla dos boquillas	418 – 538	207 - 345
Aspersor tipo Wobbler	177 - 279	69 - 172

Fuente: Ficha técnica Irrigaciones LTDA.

- *Frecuencia y duración de riego*

Durante el periodo de estudio se registraron 19 eventos de riego, con una duración promedio de dos horas y 16 minutos, siendo la duración máxima de cinco horas y la mínima de 45 minutos. La actividad de riego se realizó mayoritariamente en horas de la tarde, con 9 eventos, seguida por la mañana con 7 eventos, y 3 en horario nocturno (Tabla 9).

La Figura 12 presenta las láminas de precipitación y de riego durante el periodo de estudio. Se observó que el agricultor no realiza el riego si se registró algún evento de precipitación durante la semana. Además, que la ejecución de la actividad de riego no está relacionada con la cantidad de precipitación, sino únicamente con la presencia o ausencia de lluvia en esa semana, además del estado del cultivo. Los criterios de riego mencionados anteriormente son similares a los aplicados en Aquitania – Boyacá (primer productor de cebolla de Colombia), donde cerca de la mitad de los agricultores resaltan la observación del cultivo y de las condiciones climáticas como indicadores clave para el riego (Rodríguez- Robayo et al., 2024).

Con base en la aplicación de riego, no se observó uniformidad en el patrón de tiempo o de la lámina aplicada, debido a que el agricultor no posee instrumentos que le permita cuantificar el estado de humedad del suelo o la lámina de precipitación. No obstante, se identificó que, durante el mes de febrero del 2024, la frecuencia del riego se redujo debido a la intensidad de las sequías y de la incertidumbre sobre el fenómeno del Niño, lo que causó que esta actividad sólo se realizará dos veces, ya que los niveles del lago se encontraban bajos (ver Figura 10).

Al comparar la lámina media mensual aplicada por el agricultor de la unidad productiva de estudio con los valores reportados en literatura (ver Tabla 4), se observa que

esta es similar a lo proyectado por Huertas et al. (2020) (entre los 57 a 95 mm/semana), lo cual es superior a lo comentado por los demás autores. Al considerar los datos climatológicos de la estación meteorológica y calcular la ETo mediante la ecuación de P-M, con un valor de Kc igual a uno para cebolla larga, la lámina promedio de riego semanal estimada para la unidad productiva es de 20.7 mm, lo que significa que la lámina aplicada semanalmente es 2.6 veces superior, evidenciando un exceso de riego o un valor sobreestimado del Kc para las condiciones de páramo.

Tabla 9.

Fecha, duración y estimación de lámina de riego de la sub-parcela de estudio durante el periodo de estudio.

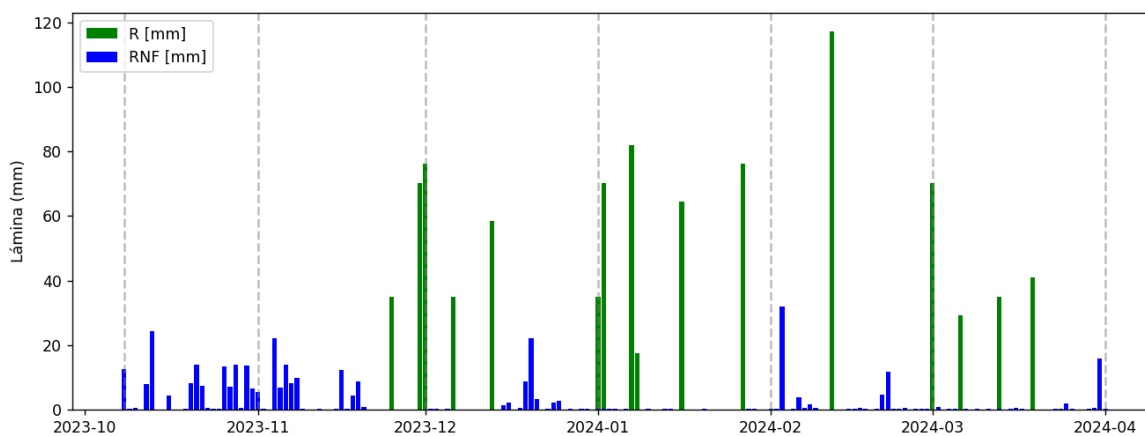
No.	Fecha	Hora		Tiempo [hora]	Tiempo [min]	Volumen [L]	Lámina [mm]
		Inicio	Final				
1	25-nov	12:30	14:00	1:30	90	7444.8	35.2
2	30-nov	17:30	20:30	3:00	180	14889.6	70.5
3	1-dic	14:30	17:45	3:15	195	16130.4	76.3
4	6-dic	13:15	14:45	1:30	90	7444.8	35.2
5	13-dic	8:45	11:15	2:30	150	12408	58.7
6	1-ene	17:30	19:00	1:30	90	7444.8	35.2
7	2-ene	9:30	12:30	3:00	180	14889.6	70.5
8	7-ene	14:15	17:45	3:30	210	17371.2	82.2
9	8-ene	11:30	12:15	0:45	45	3722.4	17.6
10	16-ene	12:30	15:15	2:45	165	13648.8	64.6
11	27-ene	15:30	18:45	3:15	195	16130.4	76.3
12	12-feb	9:30	14:30	5:00	300	24816	117.4
13	1-mar	10:45	11:30	0:45	45	3722.4	17.6
14	6-mar	7:00	8:15	1:15	75	6204	29.4
15	13-mar	17:45	19:15	1:30	90	7444.8	35.2
16	19-mar	8:15	10:00	1:45	105	8685.6	41.1
17	8-abr	12:15	15:45	3:30	210	17371.2	82.2
18	15-abr	14:00	15:00	1:00	60	4963.2	23.5
19	16-abr	8:00	10:00	2:00	120	9926.4	47
Promedio				2:16	136.6	11297.8	53.5
Desviación estándar				1:07	67.1	5547.5	26.3

Fuente: Autor.

En la Figura 12, se observan eventos de riego de dos veces por semana, lo cual contradice con el calendario de riego semanal comentado por el agricultor. Sin embargo, esto puede ser causado debido a la mala distribución de los aspersores en la sub-parcela y los efectos del viento, lo que ocasiona una doble aplicación de riego en zonas que ya han sido regadas, causando así un uso inadecuado del recurso hídrico, además de posibles afectaciones al cultivo asociadas al exceso de riego como se mencionó anteriormente.

Figura 12.

Seguimiento de los días de riego y de precipitación en la unidad productiva de estudio.



Fuente: Autor

Nota: R: lámina de riego, RNF: lámina de precipitación.

Con base a los tiempos de riego, el estudio de Rodríguez-Robayo et al. (2022) realizado en la Laguna de Tota en cultivos de cebolla larga, identificó que la frecuencia y duración del riego se relacionan con la capacitación técnica en las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) de los agricultores. Los resultados indican que los agricultores interesados en BPA riegan con menor frecuencia (cada 7 días), seguidos por aquellos con el curso BPA vigente (cada 6 días) y, finalmente, aquellos con el curso vencido (cada 5 días). En cuanto a la duración del riego, los agricultores con el curso vencido presentan el mayor tiempo (93 minutos), en contraste con los interesados (85 minutos) y aquellos con el curso vigente (84

minutos).

Los resultados mencionados anteriormente son similares a los obtenidos en la presente investigación, ya que el agricultor ha expresado su interés en la adopción de las BPA, según los resultados obtenidos en la entrevista semiestructurada. Además, la frecuencia de riego en la unidad productiva por cuadro de siembra es de alrededor de cada semana, lo cual concuerda con los hallazgos de Rodríguez-Robayo et al. (2022) para un agricultor interesado en las BPA. Sin embargo, se observa que la duración del riego en la zona de estudio es mayor que la de los agricultores con BPA vencidos (136 minutos). Esta prolongada duración del riego se debe a que el agricultor realiza otras actividades agrícolas en paralelo, como por ejemplo el movimiento del ganado, labores de ordeño, cosecha de cebolla en otras parcelas, entre otros. Como resultado, sí algunas de estas actividades se prolongan, el tiempo dedicado al riego también se aumenta.

Lo expuesto en la sección anterior evidencia que las prácticas de riego en la zona son empíricas, fundamentadas principalmente en la experiencia del agricultor y el conocimiento colectivo local. La decisión sobre cuándo y cuánto regar se basa, en gran medida, en las condiciones climáticas semanales, el estado del cultivo y un tiempo de riego estimado según la duración de otras actividades agrícolas. Estas prácticas pueden atribuirse a la falta de acompañamiento técnico en el sector, sumada a una percepción de abundancia hídrica derivada de la proximidad y disponibilidad de agua de una quebrada cercana y del lago.

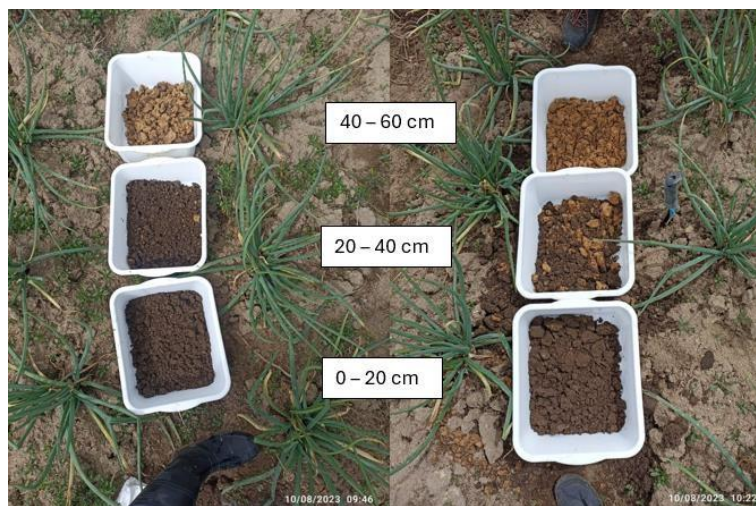
6.2. Caracterización de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo bajo las prácticas actuales de riego.

Durante el reconocimiento de la sub-parcela de estudio (Figura 3), se identificaron

dos horizontes de suelo. El primer horizonte (0–20 cm) presenta una tonalidad marrón oscuro, indicativo de alto contenido de materia orgánica (MO), abundancia de raíces de cebolla larga y una textura gruesa al tacto. Seguido de un horizonte transicional de 20–40 cm, en donde se observó una transición gradual hacia el segundo horizonte. Finalmente, el segundo horizonte (> 40 cm) posee tonalidad más clara, con menor contenido de MO, textura fina al tacto y escasez de raíces.

Figura 13.

Horizontes del suelo de estudio.



Fuente: Autor

6.2.1. Descripción general de los resultados de los muestreos mensuales

La Tabla 10, presenta un resumen estadístico detallado de la caracterización preliminar del suelo, dividiendo los resultados en diferentes propiedades físicas y químicas del suelo, a lo largo de tres profundidades: 0-20 cm, 20-40 cm, y 40-60 cm, así mismo, la Figura 14 representa gráficamente la dispersión de los resultados de las propiedades evaluadas. Se excluyeron las propiedades de densidad real, constantes de humedad y los porcentajes de arena, limo y arcilla, ya que solo se disponía de un dato puntual por

profundidad (un solo muestreo). El Anexo G presentan los resultados crudos de las propiedades de estudio. Para el caso del pH se aplicó el análisis estadístico tomando en consideración la concentración de hidrogeno del suelo.

Tabla 10.

Resumen estadístico de la caracterización preliminar del suelo.

Propiedad	n	Prof (cm)	μ	\tilde{X}	σ	CV	Mín	Máx	Rango
Da [g/cm ³]	45	0-20	0.94	0.9	0.20	0.21	0.67	1.24	0.57
		20-40	0.95	0.79	0.26	0.27	0.69	1.39	0.7
		40-60	1.02	0.86	0.30	0.29	0.69	1.58	0.89
Hm [%]	45	0-20	46.16	48.08	16.29	0.35	20.98	74.14	53.16
		20-40	46.6	52.55	17.51	0.38	22.7	68.88	46.18
		40-60	39.37	45.54	14.57	0.37	17.45	57.58	40.13
Pr [%]	45	0-20	61.91	61.84	7.17	0.12	51.03	73.72	22.69
		20-40	61.44	66.06	9.79	0.16	45.07	72.85	27.79
		40-60	58.67	63.21	11.31	0.19	37.75	72.75	35.00
pH	90	0-20	5.83	5.76	0.57	0.09	5.25	7.02	1.77
		20-40	5.70	5.75	0.74	0.12	5.07	7.45	2.38
		40-60	5.30	5.73	0.77	0.13	4.74	7.24	2.50
C.E. [μS/cm]	90	0-20	281.42	287.69	81.48	0.29	147.09	416.87	269.78
		20-40	173.20	167.05	66.21	0.38	62.93	302.33	239.40
		40-60	136.84	133.48	55.2	0.4	45.17	266.67	221.50
COS [g/kg]	90	0-20	107.85	116.34	29.31	0.27	65.08	149.53	84.46
		20-40	39.34	48.32	18.33	0.47	6.57	67.77	61.20
		40-60	26.33	25.32	15.38	0.58	4.96	52.47	47.51

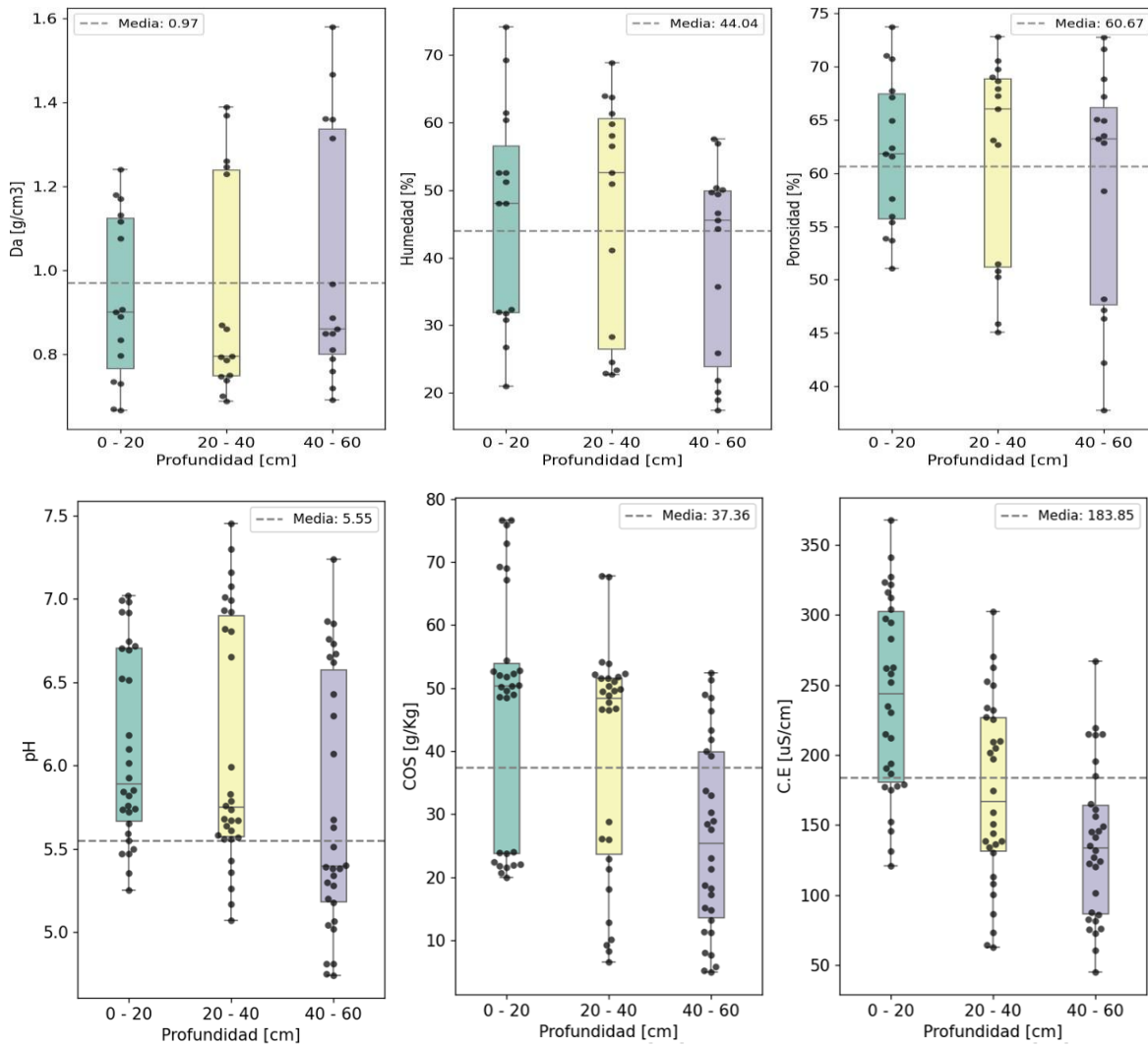
Nota: n: número de los datos; Prof(cm): Profundidad de la muestra; μ : media de los datos; \tilde{X} : Mediana de los datos; σ : desviación estándar de los datos; CV: Coeficiente de variación; Da: Densidad aparente; Pr: Porosidad; Hm: Humedad gravimétrica; COS: Carbono orgánico en el suelo; CE: Conductividad eléctrica del suelo.

Como se observó en la Tabla 10, respecto al CV en algunas propiedades, y conforme a lo evidenciado en la Figura 14, se observa que los datos de todas las propiedades analizadas mensualmente tienden a agruparse en dos conjuntos, lo cual puede estar asociado a afectos de la fase fenológica del cultivo, efectos de la temporada de sequías y lluvias, y de las distintas prácticas agrícolas implementadas en el cultivo (cosecha, arado y aplicación de

fertilizantes). Esta separación es especialmente evidente en las propiedades de COS, pH, Da y Hm, donde la diferenciación entre los grupos de datos es más marcada.

Figura 14.

Dispersión de los resultados de las propiedades evaluadas mensualmente del suelo agrupadas por profundidad.



Fuente: Autor

Da: Densidad aparente; COS: Carbono orgánico en el suelo; CE: Conductividad eléctrica del suelo.

Según la Tabla 10, la Da muestra un aumento leve con la profundidad, pasando de 0.94 g/cm³ en la capa superficial (0-20 cm) a 1.02 g/cm³ en la capa más profunda (40-60 cm).

Este incremento podría estar relacionado con el movimiento del suelo provocado por el arado manual y la cosecha, así como con la disminución de la materia orgánica (MO) a medida que aumenta la profundidad (Andrade et al., 2022). La dispersión de los datos, reflejada en un coeficiente de variación (CV) inferior a 0.3, indica una variabilidad moderada en cada capa posiblemente generada por el crecimiento desigual del cultivo.

Al comparar los resultados de la Da obtenidos en esta investigación con los valores reportados para suelos cultivados de páramo ($0.8 - 1.0 \text{ g/cm}^3$) (Avellaneda et al., 2018; Daza et al., 2014; Mosquera et al., 2019; Patiño, 2021), se observa que se encuentran dentro del rango habitual. Sin embargo, al contrastarlos con los valores de suelos no intervenidos en áreas cercanas de la unidad productiva ($0.6 - 0.9 \text{ g/cm}^3$) (Patiño et al., 2021), se encontró que la Da en la sub-parcela de estudio es superior, lo que sugiere una leve compactación del suelo. Esta compactación podría afectar el crecimiento de las raíces y reducir la infiltración y el almacenamiento de agua (Cresswell et al., 1992; Ray & Nyle, 2017).

La Hm promedio en las capas superiores (0-40 cm) es de 46.16%, disminuyendo a 39.37% en la capa inferior (40-60 cm). Esta reducción puede estar vinculada a variaciones en la textura y la disminución de la MO en los estratos más profundos, como se muestra en la Figura 13. La diferencia leve de Hm (6.79%) entre los estratos superior e inferior podría también deberse al arado, que altera la distribución del tamaño de poro (de 61.9 a 58.7%) (Benavides et al., 2018). Además, el coeficiente de variación (CV) es significativo (>0.3) en todas las profundidades, lo que refleja una dispersión considerable de los datos (Figura 14), sugiriendo una baja uniformidad en la humedad del suelo, posiblemente influenciada por factores como el riego y el manejo agrícola.

Como se mencionó anteriormente la Pr pasa de 61.9% en los estratos superiores a

58.7% en los estratos inferiores. Sin embargo, los valores son elevados en todas las profundidades, lo cual es común en suelos de páramo (Mosquera et al., 2023). Esta ligera variación podría reflejar diferencias en la textura del suelo y su capacidad para almacenar agua, elementos clave en la dinámica de humedad. Además, de también estar asociada al arado y la cosecha, actividades que tienden a homogenizar las propiedades del suelo. Los valores de coeficiente de variación (CV) son bajos (<0.3), especialmente en la capa superior (0-20 cm), lo que indica una distribución relativamente homogénea de la porosidad en cada estrato.

El pH promedio de la capa superior es cercano a 5.83, descendiendo ligeramente a 5.30 en la capa más profunda, lo cual resulta adecuado para el cultivo de cebolla larga, según Kayat et al. (2021). El leve descenso del pH puede estar asociado a la aplicación de cal en la capa superior como medida de protección para las plagas en especial la babosa (Barrera & Bautista, 2022), a la aplicación de fertilizantes basado en estiércol de aves de corral (gallinaza y/o pollinaza) que reducen la acidez del suelo (ANO & Ubochi, 2007), además del movimiento del suelo durante las temporadas de cosecha (Patiño, 2021), lo cual contribuye a una homogeneización de esta propiedad en las capas superiores. En la Figura 14 se observa una notable dispersión de los datos, que parecen agruparse en dos conjuntos, lo que sugiere la posible influencia de un factor externo o ambiental que esté generando esta diferenciación en los niveles de pH.

Al comparar los resultados de pH con otros estudios, se encontró que estos son levemente inferiores en los valores de pH reportados por Patiño et al. (2024) (en promedio pH 6.0 de 0-25 cm) para suelos cultivados con cebolla larga en áreas cercanas, lo cual indica que, la subparcela de estudio no ha presentado una fuerte intervención por parte del

agricultor al momento de la aplicación de cal para el control de babosas. Además, al comparar los resultados con los suelos cultivados con papa (otro cultivo característico de la zona) se encontró que los valores de la sub-parcela son superiores al rango para estos suelos (4.5 – 5.5), así mismo son superiores a los reportados en otras investigaciones (Avellaneda et al., 2018; Daza et al., 2014; Farfán et al., 2020; Patiño, 2021). Una posible explicación es que en el sector del páramo de Berlín el cultivo de papa generalmente se establece en suelos recién intervenidos, donde el pH es más ácido debido a la falta de manejo previo (Patiño, 2021); además, en algunos casos, la papa se utiliza como cultivo preliminar antes de establecer la cebolla larga, con el objetivo de adecuar el suelo.

La CE presentó sus valores más altos en la capa superficial (0-20 cm) con un promedio de 281.42 $\mu\text{S}/\text{cm}$, disminuyendo a medida que se profundiza, hasta alcanzar 136.84 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la capa de 40-60 cm. No obstante, los valores presentados de CE indican que el suelo no es salino ($<2000 \mu\text{S}/\text{cm}$), además de ser menor al umbral de tolerancia para los cultivos de cebolla (1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (Allen et al., 2006). El descenso de la CE a razón de la profundidad, puede estar relacionado con el aporte de nutrientes y sales en la superficie a partir de fertilizantes (Patiño, 2021), los cuales tienden a acumularse en las capas superiores y a reducirse en las inferiores por lixiviación y en la capacidad de intercambio catiónico. Los valores de CE obtenidos son comparables con los reportados por Patiño (2021) para parcelas cultivadas con papa en el área de estudio, mientras que para suelos con cultivos de cebolla larga los valores de CE son de hasta un 100% más altos en promedio, lo que puede indicar que en cuanto a la práctica de aplicación de fertilizantes esta puede variar por unidad productiva.

Por último, se obtuvo que el COS es mayor en la capa superficial (0-20 cm), con un

promedio de 107.85 g/kg (18.59% de MO), y disminuye con la profundidad, alcanzando valores de hasta 26.33 g/kg (4.54% de MO) en la capa de 40-60 cm. La alta concentración de COS en la capa superior del suelo es típica en la naturaleza de los suelos de páramo, ya que, debido a las bajas temperaturas y la precipitación, la degradación del carbono es lenta, mientras que las capas profundas reciben menos aporte de MO fresca y, por tanto, presentan menores contenidos de carbono (Mosquera et al., 2023; Patiño et al., 2021). En cuanto a su CV, éste aumenta a razón de la profundidad, lo que puede indicar que en los estratos más profundos el COS es menor uniforme, posiblemente asociado a los procesos de movimiento de suelo (arado).

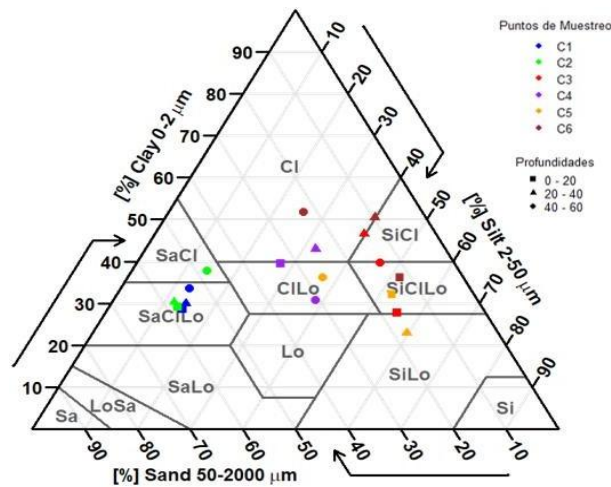
El COS en la sub-parcela de estudio es inferior a la media nacional de los ecosistemas de páramo colombiano (113 g/kg) (H. J. Andrade et al., 2022). Adicionalmente, se encontró que el rango de MO de la sub-parcela de estudio (4.54 - 18.58%) se encuentra levemente fuera del rango usual de MO para suelos cultivados de páramo (15-20%) (Patiño et al., 2021). No obstante, se encontró similitud con los resultados con la investigación de Thompson et al. (2021) para suelos cultivados con papa en cercanías de Quito (Ecuador). Los bajos contenidos de COS pueden ser un indicativo de bajos niveles de humedad en el suelo (Thompson et al., 2021), dado que la Da y la MO presentan una relación de hasta $r = -0.85$, lo que significa que bajos contenidos de MO indican altos valores de Da, lo que a su vez indica una baja porosidad, por lo tanto, existe un menor espacio disponible para el agua en el suelo (H. J. Andrade et al., 2022). Esto de acuerdo con las relaciones gravimétricas establecidas para suelos (Jaramillo, 2002).

6.2.2. *Textura y densidad real del suelo*

La textura del suelo es una de las propiedades más relevantes, ya que determina en gran medida su comportamiento y uso potencial. Esta característica es difícil de modificar sin incurrir en altos costos y esfuerzos significativos. Además, influye de manera directa en procesos físicos, químicos y biológicos esenciales, como el movimiento del agua a través del perfil del suelo, la resistencia mecánica del mismo y su fertilidad natural, factores clave para la sostenibilidad y productividad de los cultivos. (Ruiz et al., 2015)

La Figura 15 presenta la dispersión de los porcentajes de arena, limo y arcilla para los seis puntos de muestreo en las tres profundidades de muestreo. Además de su clasificación textural según el diagrama USDA (USDA, 2017). En términos generales, se observa que en promedio el suelo es de textura media a gruesa, (rango entre arenoso – franco a franco arenoso), similares a los resultados de Patiño (2021) para suelos antrópicos cercanos a la zona de estudio. A nivel de estratos se observa que la textura del suelo a nivel superficial (0-20 cm) oscila entre las familias de franco arcillo arenoso y franco arcillo limoso; en la siguiente profundidad (20-40 cm) la textura del suelo oscila entre franco arcillo arenoso y arcilloso; y en la última profundidad (40-60 cm) la textura del suelo oscila entre franco arcillo arenoso y arcilloso.

Como se observa en la Figura 15, la textura del suelo de la unidad productiva de estudio se agrupa en dos principales tipos. El primer grupo corresponde a la zona alta, donde el suelo presenta una textura más gruesa, clasificada como franco arcillo-arenoso. El segundo grupo incluye las zonas media y baja, donde el suelo tiene una textura intermedia, clasificada entre franco arcilloso y franco arcillo-limoso.

Figura 15.

Textura del suelo en los puntos de muestreo.

Fuente: Autor.

Los suelos francos arcillo-arenosos, se caracterizan por una mayor proporción de arena en comparación con los suelos francos, tienen una excelente aireación y un rápido drenaje, lo que los hace adecuados para cultivos que no toleran el encharcamiento. Sin embargo, su capacidad de retención de agua y nutrientes es limitada debido a la baja cantidad de partículas finas, como el limo y la arcilla, lo que los hace más susceptibles a la infiltración y lixiviación de nutrientes (Ray & Nyle, 2017). En contraste, los suelos franco-arcillosos, que contienen una mayor proporción de arcilla, presentan una textura más fina, lo que les otorga una mayor capacidad para retener agua y nutrientes. No obstante, su drenaje es más lento, lo que puede generar problemas de compactación si no se gestionan adecuadamente, afectando la infiltración del agua y el desarrollo de las raíces (Jaramillo, 2002). Por último, los suelos de textura fina, debido a su mayor capacidad de retención, poseen una lámina de agua fácilmente aprovechable más alta en comparación con los suelos de textura gruesa (Allen et al., 2006).

En cuanto a la Dr (Tabla G7, anexo G) mostró una baja variación en función de la profundidad, con medias alrededor de 2.40 g/cm³ en las tres profundidades analizadas. Los resultados de la Dr para los suelos de estudio son menores que el promedio de los suelos minerales (2.65 g/cm³) (Jaramillo, 2002; Ray & Nyle, 2017), lo que sugiere que el suelo podría ser rico en gibbsita (2.40 g/cm³), esto con base al análisis de roca fresca y depósitos cuaternarios localizados en cercanías de la unidad productiva de estudio (Ponce, 2024).

6.2.3. Curva de infiltración y conductividad hidráulica

La Figura 16 muestra la curva de infiltración instantánea y acumulada del suelo en la sub-parcela de estudio durante la temporada de sequías (marzo del 2024). Se observa en general en la Figura 16 una tasa de infiltración inicial en los primeros 20 minutos (>1.5 cm/min), seguido de una estabilización en 0.6 cm/min aproximadamente. Los resultados de la infiltración instantánea (ecuación 12) e infiltración acumulada estimadas (ecuación 13) por medio del modelo matemático Kostiakov se presentan a continuación:

$$I_{instantanea} = 141.57 * t^{-0.3131} (cm/h) \quad (12)$$

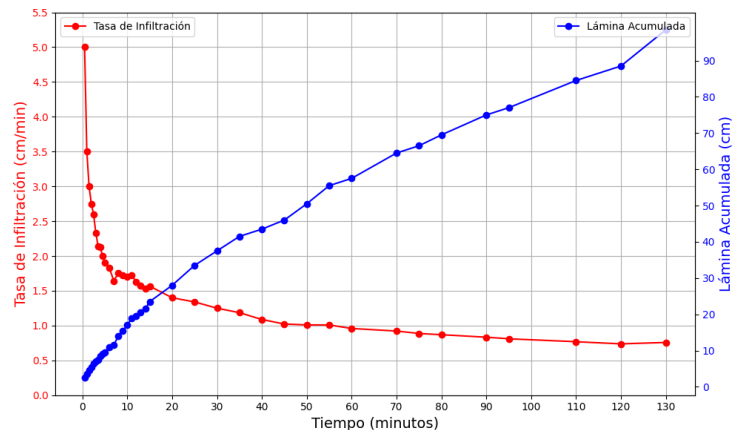
$$I_{acumulada} = 34.35 * t^{0.6869} (cm/h) \quad (13)$$

donde t corresponde al tiempo en minutos. La conductividad hidráulica saturada (K_s) del suelo fue de 27.48 cm/h, cual se puede categorizar como “alta” según Jaramillo (2002). El tiempo de básico de infiltración, corresponde al lapso en el cual el suelo se satura, para este caso fue 187.9 minutos. Como se observa en la Tabla 9, de los 19 eventos de riego identificados en la sub-parcela, 7 duraron igual o más de 180 minutos, lo que concuerda con el tiempo básico de infiltración. Esto sugiere que uno de los indicadores para pausar la actividad de riego por parte del agricultor sea la apariencia de un suelo saturado en la capa

superficial.

Figura 16.

Curva de infiltración instantánea y acumulada del suelo en la sub-parcela de estudio.



Fuente: Autor

El alto valor de K_s puede estar asociado a las condiciones meteorológicas al momento del ensayo, ya que la superficie del suelo estaba seca y presentaba grietas, aumentando así la infiltración, debido a la falta de lluvias. Así mismo, la velocidad de infiltración de agua en el suelo depende de las propiedades intrínsecas del suelo (por ejemplo, textura, densidad aparente, estructura, conductividad hidráulica saturada), las cuales controlan la dinámica del transporte de agua y los mecanismos de mezcla en el subsuelo (Mosquera et al., 2022). Como por ejemplo la alta P_r en la superficie del suelo (>50%), la textura franco arcillo arenoso y la presencia de raíces del cultivo de cebolla, facilitan la infiltración del agua (Fernández et al., 2019; Mosquera et al., 2022). Efectos como la textura, influyen significativamente a la K_s , para el caso de suelos arenosos, los valores son más altas en comparación con suelos de textura fina (arcillosos) debido a su mayor porosidad y tamaño de partículas, lo que facilita el flujo de agua alcanzando valores de hasta 108.07 mm h^{-1} (Díaz et al., 2003).

Otra posible explicación de este alto valor de K_s puede estar asociado a que, en la

unidad productiva de estudio, el ganado se encuentra encerrado en una zona alejada de los cultivos, lo cual evita la compactación del suelo, sumado con las prácticas agrícolas locales de preparación del suelo, en donde estas rompen la estructura del suelo, aumentando la relación aire/porosidad, lo que incrementa la infiltración. Sin embargo, a largo plazo, esta práctica puede generar un aumento de la Da, debilitamiento de la estructura del suelo y una pérdida de la MO lo que ocasiona una disminución de la infiltración del suelo (Patiño, 2021; Ray & Nyle, 2017).

Los resultados de K_s estimados en la presente investigación son superiores a aquellos determinados en otros estudios de suelos cultivados en páramos. Daza et al. (2009) y Benavides et al. (2018) reportaron valores de K_s de 1.10 cm/h y 2.75 cm/h respectivamente en suelos cultivados de papa, mientras que se encontró entre los resultados de Patiño (2021) una ligera similitud con suelos cultivados de papa (20.44 cm/h), no obstante, el valor de suelos con cultivos de cebolla larga (18.36 cm/h) fue inferior en comparación con la presente investigación.

Altos valores de K_s pueden afectar la eficiencia del riego en cultivos, debido a que estos poseen una rápida infiltración del agua, lo que puede resultar en una menor retención hídrica en la zona radicular y posibles pérdidas por percolación profunda (Castiglioni et al., 2018). Esto implica que el agua aplicada durante el riego puede no estar disponible para las plantas durante períodos prolongados, requiriendo aplicaciones de riego más frecuentes o volúmenes mayores para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos (como es el caso de la unidad productiva de estudio). Además, la rápida infiltración puede facilitar la lixiviación de nutrientes esenciales, disminuyendo la fertilidad del suelo y afectando negativamente el crecimiento de las plantas (Alonso-Báez et al., 2023).

6.2.4. Capacidad de retención de humedad

Con base en los resultados de las muestras recolectadas durante la campaña 3, se elaboró la Tabla 11, que presentan las constantes de humedad para las diferentes zonas de la sub-parcela de estudio junto con el porcentaje de agua aprovechable en el suelo. El valor de succión de 0 kPa representa la humedad en el punto de saturación; a 33 kPa, la humedad en la capacidad de campo (θ_{CC}); a 500 kPa, un punto intermedio de humedad entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente; y a 1500 kPa, la humedad en el punto de marchitez permanente (θ_{PMP}) (Jaramillo, 2002).

Tabla 11.

Constantes de humedad y disponibilidad de agua del suelo de estudio.

Zona	Profundidad [cm]	Humedad volumétrica (cm ³ /cm ³)				Agua aprovechable total (%)	Agua aprovechable total (mm)
		Succión (kPa)					
		0	33	500	1500		
Alta	0-20	51.25	30.53	27.07	26.23	4.3	8.60
	20-40	46.92	28.6	24.99	23.89	4.71	9.42
	40-60	42.66	35.65	32.72	31.96	3.69	7.38
Media	0-20	61.18	48.39	45.66	44.27	4.12	8.24
	20-40	62.51	41.62	38.70	37.86	3.76	7.52
	40-60	59.71	38.63	36.85	36.05	2.58	5.16
Baja	0-20	65.19	52.46	50.31	49.21	3.25	6.50
	20-40	66.97	37.19	32.99	31.36	5.83	11.66
	40-60	64.51	43.37	39.14	38.01	5.36	10.72

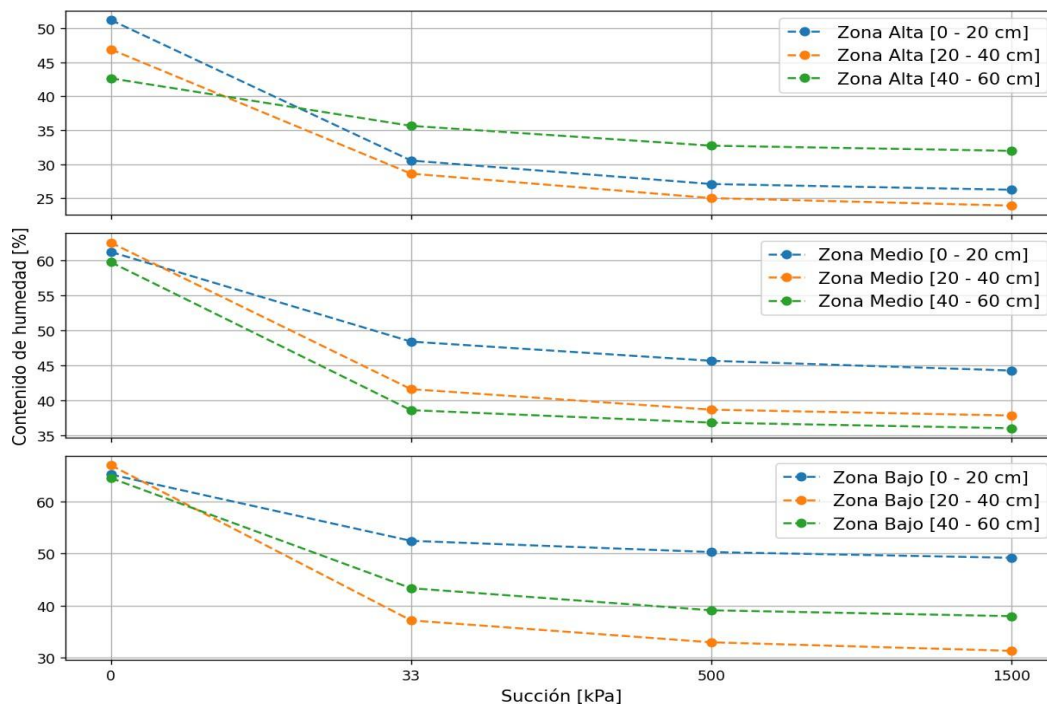
Fuente: Autor.

Los suelos de páramo son conocidos por la capacidad de almacenar grandes volúmenes de agua, debido a su baja Da y alto contenido de MO (Buytaert et al., 2006; Mosquera et al., 2023). No obstante, en términos generales se observa que el suelo de la zona de estudio posee una capacidad de retención de humedad menor al 6.0% para todas las profundidades y zonas. Al comparar estos resultados con los valores reportados en literatura

para suelos de páramo destinados para la agricultura, se observó que este se encuentra por debajo del rango promedio de retención de humedad (10-50%) (Patiño et al., 2021), donde los autores informan que la reducción de retención de agua se relaciona con el desarrollo de las prácticas agrícolas locales, ya que estas alteran la estructura del suelo, aumentan el diámetro de poros, entre otros (Daza et al., 2014; Patiño, 2021).

Figura 17.

Curva de retención de humedad del suelo para las diferentes zonas de la sub-parcela de estudio.



Fuente: Autor

En la Figura 17, se observó que las constantes de humedad son superiores en la capa intermedia en las zonas media y baja, en contraste con la zona alta. Esta diferencia puede atribuirse a las variaciones texturales previamente descritas. Una posible explicación para este comportamiento, como se mencionó anteriormente, es que la zona alta presenta una textura más arenosa en comparación con las otras zonas (Figura 15), factor que afecta

directamente la capacidad de retención de humedad del suelo (Hillel, 1998; Ray & Nyle, 2017), esto debido a que el diámetro medio los poros de suelos arenosos son más grandes en comparación con suelos arcillosos, lo que favorece una rápida pérdida de agua por infiltración en lugar de su retención (Bejar et al., 2020).

El porcentaje de agua aprovechable total de la zona baja (4.81%) es superior en menor medida que las zonas alta (4.23%) y media (3.50%). Este comportamiento se podría deber al mayor contenido de coloides (arcilla y humus) en la zona baja, donde la pendiente, la precipitación y el riego favorecen el transporte de estos materiales por escorrentía (Jaramillo, 2002). Además, la profundidad de 20-40 cm en comparación con las otras dos capas de suelo, presenta un mayor porcentaje de humedad, ya que, esta presenta una menor incidencia a las condiciones ambientales como la radiación solar, generando una degradación de la materia orgánica es más lenta (Andrade et al., 2022),

En cuanto a la media del punto de saturación (succión = 0 kPa) de la zona de estudio fue de $57.87 \pm 8.24\%$, valor por debajo de la media de los suelos naturales de páramo, los cuales pueden almacenar más de su propio peso en agua (> 100%). Además de también ser inferior a la media de los suelos destinados para la agricultura (aproximadamente 80%) (Buytaert et al., 2006; Patiño et al., 2021), esta reducción es generada posiblemente por la alteración continua de la estructura del suelo (movimiento del suelo por acción de la cosecha), degradación de la MO, por último, ciclos de humedecimiento – secado y biología del suelo (García, 2007). Los bajos porcentajes de saturación en la capa superficial del suelo pueden dar lugar a encharcamientos, lo que favorece la escorrentía superficial además de procesos erosivos (Daza et al, 2014), además de facilitar el transporte de nutrientes generando efectos como los observados en la Figura 10.

Es importante destacar que el porcentaje de agua aprovechable total no es igualmente aprovechable por el cultivo en todo el rango de humedad del suelo. A medida que el nivel de humedad disminuye, el cultivo requiere de un mayor esfuerzo para extraer agua del suelo, lo que impacta negativamente la velocidad de uso del agua y, en consecuencia, la producción del cultivo. De manera que, en los sistemas de riego, distintos autores recomiendan permitir un agotamiento en el rango del 40 al 60 % de la humedad disponible, esto con el objetivo de mantener los niveles de humedad óptimos para el cultivo y que este no experimente estrés hídrico (Allen et al., 2006; Vásquez et al., 2017).

6.2.5. Análisis espacial de las propiedades evaluadas del suelo

Con el objetivo de comprender la agrupación observada en los resultados de algunas propiedades evaluadas (Figura 14), se realizó un análisis por componentes principales (ACP) con los resultados de las propiedades del suelo medidas en el periodo de monitoreo (Da, Hm, Pr, pH, C.E, COS). En la Tabla 12 se muestra la variabilidad total y acumulada de las propiedades del suelo en el ACP para tres componentes, los cuales explican el 83.6% de la variabilidad del suelo estudiado. Además, la Figura 18, representa de forma gráfica los vectores propios de cada una de las propiedades del suelo evaluadas en dos componentes principales.

Tabla 12.

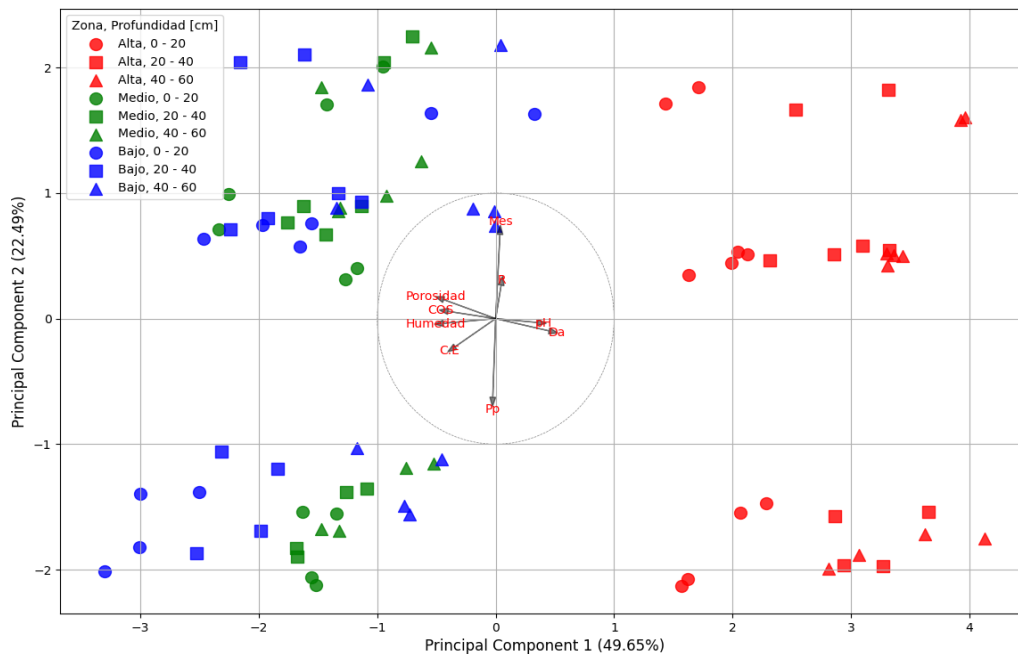
Variabilidad respondida por cada uno de los componentes

Componentes	CP1	CP2	CP3
Proporción de la varianza explicada	0.497	0.225	0.115
Varianza explicada acumulada	0.497	0.721	0.836
Vectores propios			
Densidad aparente [g/cm ³]	0.451	-0.098	0.081
Contenido de humedad [%]	-0.443	-0.037	-0.007
Porosidad total [%]	-0.439	0.151	-0.143
pH	0.354	-0.031	-0.284
Contenido de carbono orgánico en el suelo [g/kg]	-0.402	0.058	0.021
Conductividad eléctrica [μS/cm]	-0.342	-0.224	0.079
Mes	0.036	0.67	-0.010
Precipitación [mm]	-0.024	-0.626	0.308
Riego [mm]	0.046	0.266	0.889

Nota: CP: Componente principal.

Figura 18.

Vectores propios de variabilidad de las propiedades del suelo (dos componentes).



Nota: Da: Densidad aparente; C.E: Conductividad eléctrica; COS: Carbono orgánico en el suelo; Pp: Precipitación; R: Riego.

La CP1 y el CP2 explican el 49.65% y el 22.49% de la varianza total respectivamente, en conjunto, las dos CP explican el 72.1% de la variabilidad de los datos. Al observar la agrupación de los resultados de las propiedades (Figura 18), hay una clara separación en función de la zona. Los resultados de la zona "alta" (marcadas en rojo) se agrupan en el lado derecho del gráfico, principalmente en el cuadrante positivo del componente principal 1. En contraste, los resultados de la zona "media" (marcadas en verde) y "baja" (marcadas en azul) se agrupan en el lado izquierdo del gráfico, en la parte negativa de la CP1, más alejado que los resultados de la zona "media", sin embargo, se observa que la variabilidad de estas dos zonas es similar en algunos puntos. La profundidad también presentó influencia en la distribución de los resultados, pero el criterio de "Zona" tiene un mayor peso en la separación de los grupos.

Observando la variabilidad de las propiedades, las variables Pr y Hm están altamente correlacionadas entre sí y ambas tienen una fuerte influencia en la dirección del CP2, además de ser opuestas a las variables Da y Dr, las cuales están más alineadas a la PC1. La fuerte relación entre la Pr y las Dr y Da puede atribuirse a las relaciones gravimétricas. Las variables Da, Dr y pH están más alineadas con el CP1, lo que sugiere que estas variables tienen una influencia significativa en esta dirección. Las variables COS y CE están más influenciadas por el CP2, aunque también en menor medida está la variable de pH.

Para evaluar el efecto de la "zona" en las propiedades de COS y pH, se utilizó la prueba no paramétrica de Mann-Whitney U, ya que estas variables no mostraron una distribución normal. En contraste, la CE sí mostró normalidad en su distribución, de manera que se analizó mediante la prueba t-Student. En todos los casos, el nivel de significancia aplicado fue del 5% para los pares de muestras: ('C1', 'C2'), ('C3', 'C4') y ('C5', 'C6'). Este

análisis buscó identificar si existían diferencias significativas entre los puntos de muestreo dentro de cada zona de estudio (alta, media y baja).

En caso de las propiedades de Da, Pr y Hm, estas fueron recolectadas en un solo punto por zona, de manera que este punto es representativo para la zona. Por último, no se realizó este análisis para las propiedades de textura, Dr y las constantes de humedad del suelo, ya que estas solo se estimaron para un mes en particular y, según la literatura, no presentan variaciones significativas en periodos de meses (Ray & Nyle, 2017).

La Tabla 13 presenta los resultados de las comparaciones de las parejas de los puntos de muestreo localizados en la misma zona. En resumen, se encontraron diferencias significativas en las parejas C1 y C2 para las propiedades de pH, CE y COS en la profundidad de 20-40 cm, además de la profundidad de 40-60 cm, pero solo para el COS. Para las demás comparaciones pareadas entre puntos no se encontraron diferencias significativas ni en profundidad ni por propiedad.

Tabla 13.

Comparación de las propiedades químicas del suelo de estudio por punto de muestreo.

Propiedad	Prof (cm)	Zona / Punto								
		Alta			Media			Baja		
		C1	C2	Valor p	C3	C4	Valor p	C5	C6	Valor p
pH	0-20	6.77	6.83	0.84	5.90	5.83	0.84	5.65	5.66	0.25
	20-40	6.86	7.18	0.03	5.70	5.68	1.00	5.63	5.56	0.15
	40-60	6.66	6.53	0.15	5.39	5.37	0.92	5.13	5.33	0.68
CE [μS/cm]	0-20	189.69	152.50	0.09	284.75	280.73	0.92	269.23	272.20	0.93
	20-40	123.91	81.95	0.02	216.95	203.07	0.69	200.35	212.97	0.71
	40-60	92.11	91.63	0.98	200.29	151.47	0.23	12.83	157.59	0.21
COS [g/kg]	0-20	22.82	21.60	0.15	60.72	54.70	0.30	54.48	64.16	0.31
	20-40	22.88	9.41	0.01	53.51	53.67	1.00	45.49	51.08	0.42
	40-60	13.86	6.33	0.01	45.38	40.06	0.22	23.99	28.38	0.55

Las diferencias significativas observadas en la profundidad de 20-40 cm entre los puntos C1 y C2 podrían estar asociadas a una baja uniformidad en el riego, en el movimiento de tierras durante el arado y en la aplicación de fertilizantes, sumado a factores como la pendiente y la textura franco arcillo arenoso del suelo, que facilitan el drenaje (Daza et al., 2009) y provocan una disminución gradual de nutrientes y una reducción de cationes basificantes, lo cual puede resultar en un incremento de la acidez del suelo (Porta et al., 2010). Luego de definir las diferencias significativas en las propiedades químicas del suelo por zona, se procedió con la comparación de las propiedades entre las zonas de muestreo (alta, media y baja), cuyos resultados se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14.

Comparación de las propiedades evaluadas del suelo por zona de muestreo.

Propiedad	Prof (cm)	Zona			Valor p
		Alta	Media	Baja	
Da [g/cm ³]	0-20	1.16 ± 0.06 ^a	0.84 ± 0.1 ^b	0.81 ± 0.18 ^b	0.012
	20-40	1.30 ± 0.07 ^a	0.84 ± 0.04 ^b	0.72 ± 0.03 ^c	< 0.01
	40-60	1.42 ± 0.11 ^a	0.82 ± 0.06 ^b	0.84 ± 0.1 ^b	< 0.01
Hm [%]	0-20	28.56 ± 4.78 ^a	50.50 ± 2.29 ^b	59.42 ± 16.45 ^b	0.012
	20-40	24.38 ± 2.32 ^a	52.20 ± 7.11 ^b	63.21 ± 3.95 ^c	< 0.01
	40-60	20.85 ± 3.24 ^a	46.26 ± 6.18 ^b	51.02 ± 6.02 ^b	< 0.01
Pr [%]	0-20	54.32 ± 2.42 ^a	65.33 ± 5.21 ^b	66.10 ± 6.18 ^b	0.013
	20-40	48.71 ± 3.01 ^a	65.91 ± 2.98 ^b	69.69 ± 2.21 ^c	< 0.01
	40-60	44.32 ± 4.31 ^a	66.83 ± 3.67 ^b	64.87 ± 5.18 ^b	< 0.01
pH	0-20	6.76 ± 0.19 ^a	5.84 ± 0.41 ^b	5.54 ± 0.17 ^c	< 0.01
	20-40	6.96 ± 0.24 ^a	5.68 ± 0.53 ^b	5.43 ± 0.13 ^c	< 0.01
	40-60	6.50 ± 0.26 ^a	5.36 ± 0.75 ^b	4.99 ± 0.16 ^c	< 0.01
CE [μS/cm]	0-20	171.09 ± 34.43 ^a	282.74 ± 56.89 ^b	270.72 ± 52.36 ^b	< 0.01
	20-40	102.93 ± 30.65 ^a	210.01 ± 50.19 ^b	206.66 ± 49.29 ^b	< 0.01
	40-60	91.87 ± 25.46 ^a	175.88 ± 62.19 ^b	142.76 ± 36.37 ^b	< 0.01
COS [g/kg]	0-20	22.21 ± 1.35 ^a	57.71 ± 10.77 ^b	59.32 ± 11.52 ^b	< 0.01
	20-40	16.14 ± 7.60 ^a	53.59 ± 7.69 ^b	48.28 ± 7.27 ^b	< 0.01
	40-60	10.09 ± 4.56 ^a	42.72 ± 8.56 ^b	26.19 ± 8.76 ^c	< 0.01

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

Las diferencias significativas observadas entre las zonas (alta, media y baja) a diferentes profundidades reflejan variaciones importantes en las propiedades del suelo. En general, la zonas media y baja son similares en casi todas las propiedades y profundidades a excepción del caso del pH. No obstante, la zona baja presenta los valores más bajos de Da y los más altos de Hm, Pr y COS, lo que sugiere una mayor capacidad de retención de agua como se observó en la Tabla 11. En contraste, la zona alta muestra los valores más altos de Da y los más bajos de COS, Pr y Hm, indicado que en esta zona la capacidad de retención de humedad es menor (Tabla 11). La zona media, por su parte, presenta valores intermedios, con una mayor concentración de sales solubles en el suelo, como lo indica su mayor CE. Estas diferencias pueden estar asociadas con la textura del suelo, el manejo agrícola y las características específicas de cada zona, como la pendiente y la actividad de riego.

La Da en la zona alta es aproximadamente un 50% superior a la de las zonas media y baja para los tres estratos, esto debido al tipo de textura del suelo entre las zonas, la pendiente del terreno y al contenido de materia orgánica en el suelo. En donde la textura de la zona alta es más gruesa debido a una mayor presencia de arenas (franco arcilloso arenoso), en comparación con las zonas media y baja, donde la textura del suelo es más liviana (franco arcilloso a franco limoso), esto puede ser causado por efecto del arrastre por escorrentía de material más fino (arcilla y humus) producto de la precipitación y el riego (Jaramillo, 2002). La Pr de la sub-parcela se puede clasificar como excelente (55 – 70%), para las zonas baja y media, sin embargo, para la zona alta la porosidad se puede considerar como baja (Jaramillo, 2002; Vásquez et al., 2017).

El contenido de COS de la zona alta es hasta un 44.6% menor en promedio en comparación con las zonas media y baja. Una explicación de la diferencia significativa de

COS entre la zona alta y las zonas media y baja, pueden ser los efectos de arrastre y acumulación de materia orgánica a las zonas más bajas por efecto de la pendiente. Los altos valores de COS en las zonas baja y media tienen un impacto directo en la Hm y Pr, ya que al ser propiedades derivadas de la Da, esta última tiene una relación directa con el COS (Andrade et al., 2022; Thompson et al., 2021), lo cual generan que la Pr y la Hm de esta zona sean aproximadamente un 26% y 54% mayores que la zona alta.

Continuando con la comparación entre las zonas alta, media y baja, se observa que el pH del suelo en la zona alta es mayor en comparación con las otras zonas (aproximadamente un 22% para las tres profundidades), presentando valores casi neutros (pH entre 6.5 y 6.96). En contraste, las zonas media y baja presentan un pH moderadamente ácido (pH entre 5.43 y 5.84) en los primeros 40 cm del suelo, y fuertemente ácido ($\text{pH} < 5.5$) en el rango de 40 a 60 cm de profundidad (ICA, 1992). Estas diferencias en las tres zonas pueden ser atribuidas por efectos de la pendiente, en donde el arrastre y acumulación de la materia orgánica provenientes de los abonos a las zonas más bajas, se descomponen liberando ácidos orgánicos, reduciendo así el pH (Patiño, 2021).

Por último, la CE de la zona alta mostró valores de más bajos en comparación con las zonas media y baja, con una diferencia de aproximadamente el 44%. Esta variación podría ser generada por la baja uniformidad de aplicación de fertilizantes (Patiño, 2021). Además, de que la textura gruesa (mayor presencia de arenas) de la zona alta genera baja retención de agua y de nutrientes en comparación con las zonas baja y media, lo que también podría contribuir a las diferencias observadas en los valores de CE.

Al comparar la CE en la última capa (40-60 cm) entre las zonas alta, media y baja, se observa una mayor concentración de sales disueltas en la zona media (175.88 $\mu\text{S}/\text{cm}$) en

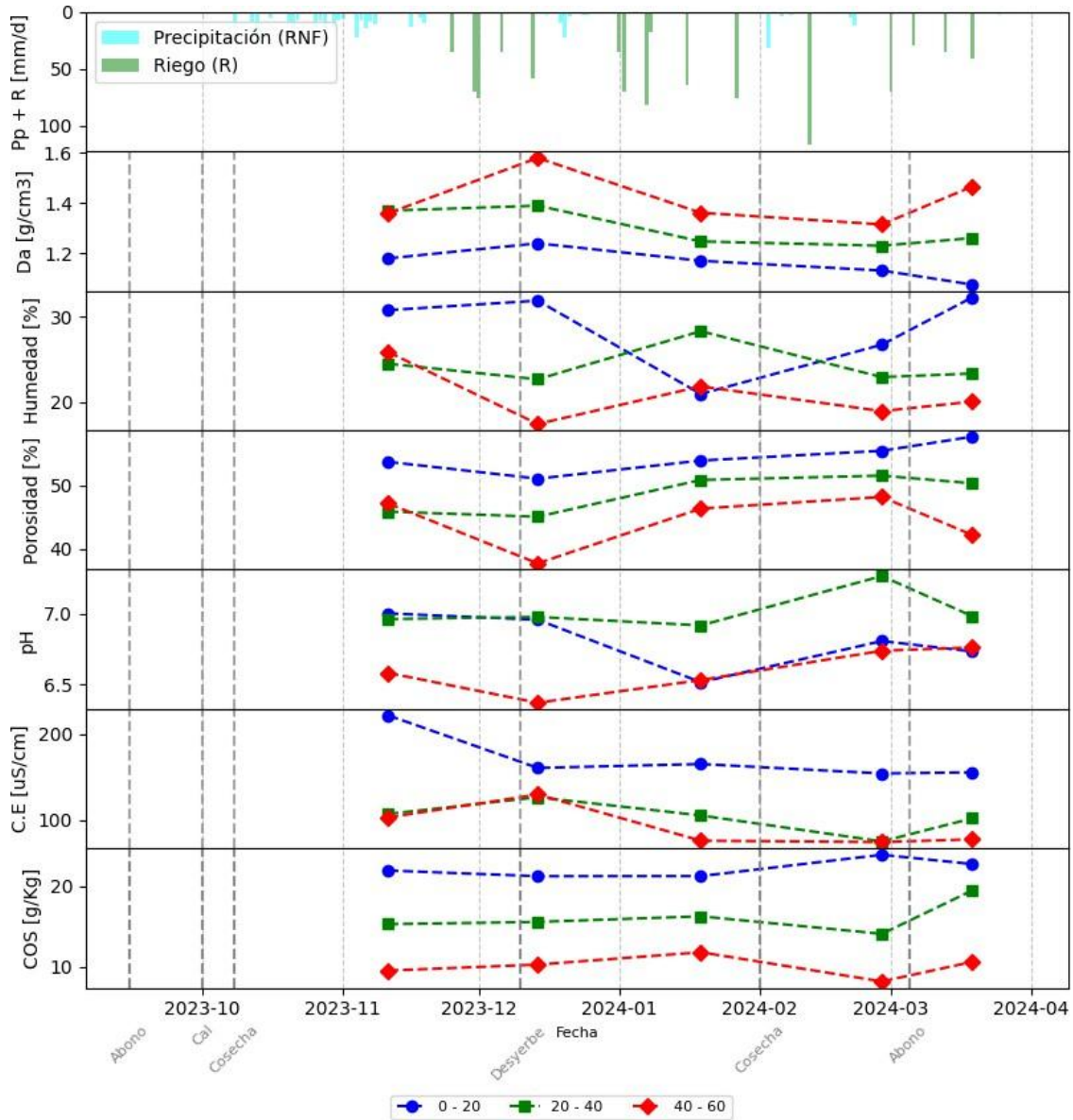
comparación con las zonas alta (91.87 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y baja (142.76 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Esto sugiere que no se presenta una acumulación en la zona más baja por efectos de la pendiente del terreno. Una hipótesis para este fenómeno puede estar asociado a la alta infiltración del suelo (27.48 cm/h), lo cual puede generar que predominen los flujos verticales sobre los horizontales. Una hipótesis para este fenómeno está asociada a la alta capacidad de infiltración del suelo (27.48 cm/h), lo cual favorece que los flujos verticales predominen sobre los horizontales, limitando la acumulación de sales en las zonas más bajas. Sin embargo, para verificar esta hipótesis, sería necesario realizar investigaciones adicionales mediante el uso de modelos de transporte de agua y solutos, como Hydrus, que permiten simular de manera detallada los procesos de infiltración, lixiviación y redistribución de sales en el perfil del suelo bajo condiciones específicas de manejo y características del terreno.

6.2.6. Análisis temporal de las propiedades hidrofísicas del suelo

Con el objetivo de determinar la incidencia de las prácticas agrícolas relacionadas con el riego en las propiedades evaluadas, se optó por analizar las posibles diferencias en las propiedades a lo largo de los meses de muestreo mediante la prueba no paramétrica de Friedman y ANOVA de Medidas repetidas. Se examinaron los cambios en la zona “Alta” de la sub-parcela y en la zona “Media – Baja” por separado, esto debido a que la zona alta presenta diferencias significativas con respecto a las zonas baja y media, mientras que las zonas baja y media no muestran diferencias entre sí, a excepción del pH. Las Figuras 19 y 20 presentan de manera gráfica la variación de las propiedades de estudio a lo largo de los meses de monitoreo, además de las distintas prácticas agrícolas desarrolladas durante ese mismo periodo de tiempo. Por último, las Tablas G11 y 12 (Anexo G) presenta un resumen de los promedios mensuales y los valores Valor p para cada una de las propiedades.

Figura 19.

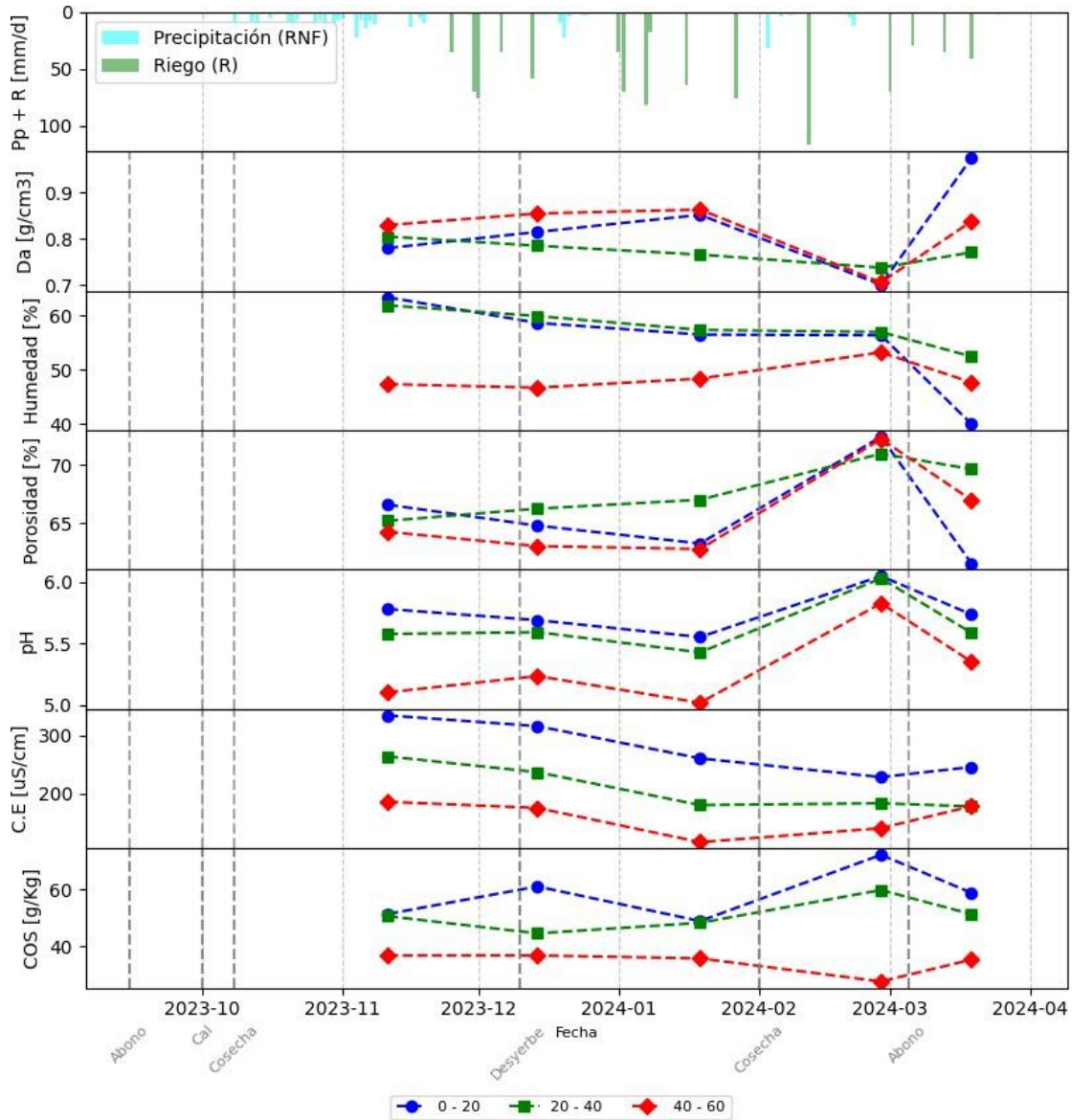
Variación de las propiedades evaluadas de estudio durante los meses de monitoreo para la zona “alta”



Nota: Pp + R; Precipitación más riego; Da: Densidad aparente; C.E: Conductividad eléctrica; COS: Carbono orgánico en el suelo.

Figura 20.

Variación de las propiedades evaluadas de estudio durante los meses de monitoreo para la zona “media - baja”



Nota: Pp + R; Precipitación más riego; Da: Densidad aparente; C.E: Conductividad eléctrica; COS: Carbono orgánico en el suelo.

Con base en los resultados presentados en las Tablas G11 y G12 (Anexo G), se observa que las propiedades evaluadas de la zona "alta" no presentan diferencias significativas ($p > 0.05$) durante el periodo de seguimiento de 5 meses. Por otro lado, en la zona "media – baja", las propiedades evaluadas mostraron diferencias significativas a lo largo del tiempo en especial en la capa superior, aunque en la mayoría de estas no presentaron cambios significativos en el tiempo. En ambas zonas el comportamiento de las propiedades físicas fue más constante que las propiedades químicas. Para el caso de la zona "media – baja" se presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en las propiedades de CE y COS para meses de octubre de 2023 y enero de 2024 respectivamente para cada propiedad, ambos para la primera profundidad (0 – 20 cm).

Las propiedades físicas del suelo, como la Da, la Pr y la Hm, presentaron una menor variabilidad en comparación con las propiedades químicas, como el pH, la CE y el COS, en especial el pH. Esta diferencia podría estar relacionada con las prácticas de fertilización implementadas por el agricultor, así como con la temporada de sequías ocurrida a inicios de 2024. Estas dinámicas influyen en la química del suelo, por ejemplo, mediante la aplicación de fertilizantes a base de estiércol de ave de corral y cal, los cuales incrementan la CE y el pH. En contraste, durante la temporada de lluvias, o exceso de riego se observan efectos como la reducción de estas concentraciones probablemente al transporte y pérdida de nutrientes a través de procesos de lixiviación (ANO & Ubochi, 2007; Patiño, 2021), no obstante, se requiere de investigaciones adicionales para comprobar esta hipótesis.

Durante el periodo de recolección y caracterización de las propiedades del suelo, se presentó una temporada de lluvias (octubre y noviembre del 2023) y una temporada de sequía más extendida (diciembre 2023 – marzo 2024) por efectos del fenómeno del Niño

experimentado a inicios del 2024 en Colombia. Lo cual permitió observar el comportamiento de las propiedades del suelo en los dos posibles escenarios, no obstante, solo la primera fecha de muestreo (11 de noviembre del 2023) coincidió con la temporada de lluvias, las demás fechas correspondieron a la temporada de sequías.

Como se observa en las Figuras 19 y 20, se esperaba que se presentaran diferencias significativas en especial para la Hm durante la temporada de lluvias (octubre y noviembre del 2023) en comparación con la temporada de sequías (diciembre 2023 – marzo del 2024). Sin embargo, debido a las continuas aplicaciones de riego durante la temporada de sequía y a la baja capacidad de retención de humedad del suelo, además del movimiento del cultivo después del desyerbe y cosecha, generaron que no se presentaran diferencias significativas a lo largo del periodo de monitoreo para las propiedades de Da, Hm, Pr y CE, similar a lo observado por Patiño (2021) para cultivos de cebolla larga localizados en zonas aledañas, debido a la homogenización el suelo por acción de las prácticas agrícolas.

La CE mostró una tendencia decreciente a lo largo del tiempo, atribuida al posible efecto de lavado de sales provocado por la precipitación (temporada de lluvias) y el riego. En el caso del pH, esta presentó un leve decrecimiento durante el periodo de monitoreo, no obstante, no presentó cambios representativos a lo largo del monitoreo, esto posiblemente relacionado a los movimientos de suelo asociados a la actividad de cosecha los cuales homogenizan las propiedades del suelo (Patiño, 2021). Además de la adición de abonos basados en estiércol de aves de corral (como pollinaza o gallinaza), lo cual generó un leve aumento puntual en promedio de 0.65 en los valores de pH, debido a que el estiércol puede incrementar el pH por la presencia de bicarbonatos, que actúan como agentes neutralizantes al reducir la concentración de iones H^+ . No obstante, posterior a este aumento

puntual se genera un descenso en el pH por efecto de la descomposición de la materia orgánica en donde se generan ácidos orgánicos (húmicos y fúlvicos), que pueden acidificar el suelo (Rayne & Aula, 2020).

Para el COS, el cual tiene influencia directa con la Da (H. J. Andrade et al., 2022; Walteros et al., 2022), que a su vez tiene influencia en las propiedades de Pr y Hm debido a las relaciones gravimétricas (Jaramillo, 2002). En la zona “alta” no se presentó variaciones de esta propiedad en ninguno de los meses de monitoreo, no obstante, para el caso de la zona “media – baja”, las diferencias significativas se presentaron durante los cinco meses en la capa superficial (0-20 cm). La explicación de estas diferencias significativas se explica a continuación:

Durante el primer mes, la subparcela experimentó una temporada de alta precipitación y nubosidad, lo que redujo la degradación del carbono presente en el suelo, además de reducir la Da. Además, en septiembre se aplicaron abonos con base de estiércol de pollo (aporte de MO). Durante el segundo mes, la subparcela fue arada con un motocultor, lo que homogeneizó el COS almacenado en los estratos inferiores con los estratos superiores, resultando en un contenido de COS similar durante estos dos meses.

En el tercer mes, la zona experimentó una temporada de sequías, agravada por el fenómeno de El Niño, lo que provocó una degradación acelerada del COS debido a las altas temperaturas. En el cuarto mes, se llevó a cabo la cosecha en la subparcela, acompañada de movimientos de tierra y el reingreso de materia orgánica al suelo mediante el delcalcete (eliminación de la capa externa u hojas dañadas para mejorar la apariencia del cultivo).

Finalmente, en el quinto mes, la subparcela fue abonada nuevamente, lo que ocasionó que el contenido de COS fuera similar al mes anterior.

La dinámica del COS generó ligeras variaciones en la Da del suelo en la zona media-baja, especialmente en la capa superior. Según investigaciones de Patiño (2021) (Páramo de Berlín) y Avellaneda et al (2018) (Parque Nacional Natural los Nevados), las prácticas agrícolas impactan más las propiedades hidrofísicas del suelo en páramos que la precipitación, siendo estos cambios más evidentes en las capas superficiales y más pronunciados en propiedades químicas (pH, CE, COS) debido a fertilizaciones empíricas, mientras que las propiedades físicas (Da, Pr, Hm) se ven más afectadas por el arado y el ganado.

6.3. Estimación de indicadores de gestión del agua en la agricultura.

En esta sección se presentan los resultados de: i) caracterización hidrológica de la zona de estudio, ii) estimación de las entradas y salidas de agua derivadas del balance hídrico en el suelo, iii) estimación de los indicadores de gestión del agua para riego, iv) estimación de indicadores de eficiencia del sistema de riego, y v) análisis de la eficiencia del esquema de riego en la unidad productiva. Los resultados de validación de los datos meteorológicos se encuentran en el anexo K y el procedimiento y los resultados de la calibración de los sensores de humedad se encuentran en los anexos I y J.

6.3.1. Caracterización hidrológica de la zona de estudio

Durante el periodo de monitoreo, a nivel horario se observó en la zona que la radiación solar influyó en algunas variables climáticas. Entre las 9:00 am - 12:00 pm. se registraron los valores máximos de radiación solar (2.8 MJ/m²/h), temperatura del aire

(13.50°C), punto de rocío (8.9°C), y velocidad del viento (7.90 km/h), así como el valor mínimo de humedad relativa (69.73%). De manera contraria, durante la noche (6:00 pm – 5:00 am) se reportaron los valores mínimos de temperatura (4.14°C) y velocidad del viento (1.01 m/s), así como un aumento en la humedad relativa (93.3%) (Anexo L). Estas fluctuaciones mencionadas anteriormente son características de los páramos (Buytaert et al., 2006; Llambí et al., 2013).

A nivel diario, la temperatura media fue de 8.72 °C, con poca variación, alcanzando un mínimo de hasta -6.8 °C en enero y un máximo de 19.3 °C en marzo y abril de 2024. La radiación solar media fue de 20.43 MJ/d, con un incremento notable en enero de 2024 y alta dispersión en febrero-abril, probablemente debido al fenómeno de El Niño. La humedad relativa media fue del 85.54%, mostrando una variación significativa en enero de 2024, con mínimos de hasta 37.1%. La velocidad media del viento fue de 3.55 km/h, con ligeros aumentos en diciembre, enero y abril, pero sin grandes fluctuaciones. La temperatura media del punto de rocío fue de 6.10 °C, con mínima variación excepto en enero de 2024, cuando descendió hasta -5.58 °C, siguiendo un patrón similar al de la humedad relativa (Tabla L1, Anexo L).

En cuanto a las salidas y entradas de agua en forma de precipitación y ETo, la precipitación media diaria fue de 2.36 mm/día, donde en enero de 2024 se registró mínimos de 0.2 mm/día y máximos en octubre de 2023 y abril de 2024 de hasta 24.4 y 20.9 mm/día respectivamente, asociado al comportamiento bimodal de la zona. La ETo media fue de 3.01 mm/día, destacándose nuevamente el mes de enero con un comportamiento diferente, ya que la ETo llegó a valores de hasta 5.10 mm/día. Esto, sumado a la escasez de lluvias durante el mismo periodo, demuestra la intensidad de la sequía en dicho mes.

Los valores de ETo locales fueron similares a los resultados obtenidos por Gómez (2022) (2.93 mm/día) cuya investigación se desarrolló en una zona cercana de la unidad hidrográfica donde se localiza la finca de estudio. Sin embargo, al comparar este valor de ETo con los reportados en la literatura estimados por medio de la ecuación de P-M, se observa que es superior a otras estimaciones en ecosistemas de páramo ecuatorianos cuyos valores oscilan entre los 1.4 – 2.6 mm/día (Guzmán et al., 2015; Iñiguez et al., 2016; Sklenář et al., 2015). Una posible explicación puede ser que la radiación solar promedio diaria de la zona estudio (20.43 MJ/m²) es superior a la de los páramos ecuatorianos (rango entre 12.94 – 14.65 MJ/m²), en donde esta variable afecta directamente los procesos de evapotranspiración (Ochoa-Sánchez et al., 2020). La Tabla 15 resume los datos meteorológicos a nivel mensual del periodo de estudio (octubre 2023 a abril 2024).

Tabla 15.

Resumen meteorológico mensual de la zona durante el periodo de estudio.

Mes	Tmed (°C)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Pr (°C)	R (MJ m ⁻² día ⁻¹)	HR (%)	U (km h ⁻¹)	P (mm)	ETo (mm)
Octubre	8.87	17.2	0.1	7.54	15.1	91.88	1.91	170.2	74.1
Noviembre	8.78	16.7	-0.5	6.76	19.15	88.02	3.47	94.3	83.6
Diciembre	8.4	17.3	-3.7	6.57	20.25	89.2	3.72	44.8	87.5
Enero	7.72	18.9	-6.8	2.16	26.31	72.72	4.21	2.2	114.2
Febrero	8.71	18.8	-4.3	6.43	21.54	87.1	3.19	59.4	90.4
Marzo	9.27	19.3	-1.0	6.81	22.12	85.78	4.32	22.6	103.4
Abril	9.28	19.3	0.9	5.50	18.54	84.22	4.05	109.8	88.6
Total	-	-	-	-	-	-	-	503.3	641.7
Promedio Mensual	8.72	18.21	-2.2	5.97	20.43	85.56	3.55	74.8	91.7

Nota: Tmed: temperatura promedio mensual; Tmáx: Temperatura máxima del mes; Tmín: Temperatura mínima del mes; Pr: Punto de rocío media mensual; R: radiación solar media diaria; HR: Humedad relativa media diaria; U: Velocidad del viento promedio diaria; P: Precipitación total mensual; ETo: Evapotranspiración de referencia total mensual.

El mes de enero provocó un mayor requerimiento hídrico en el cultivo de cebolla larga debido a la combinación de precipitación mensual más baja y la ETc mensual más alta. Esta situación obligó a los agricultores a depender completamente de fuentes hídricas locales (quebradas y/o reservorios) para el riego. Además, la comunidad comentó que enero es el mes con mayores pérdidas económicas debido a la escasez de lluvias y las heladas (temperaturas bajo cero grados en horas de la madrugada), que afectan severamente los cultivos. Esto los lleva a realizar sus actividades de riego con mayor frecuencia y programar sus cosechas antes de esta temporada para minimizar las pérdidas económicas.

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

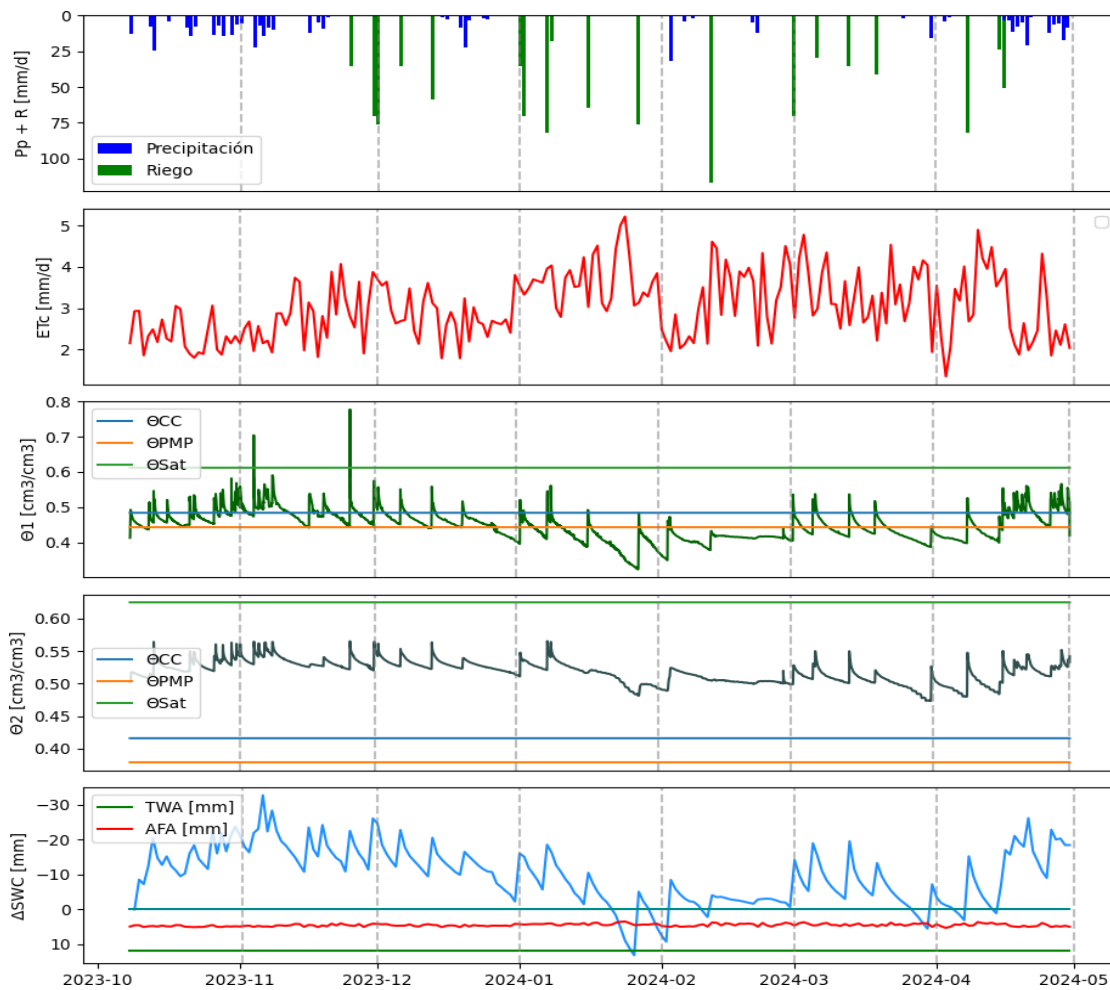
Tomando como referencia la metodología de balance hídrico en el suelo de Allen et al (2006), la meteorología de la zona, el seguimiento de la humedad del suelo (a 15 y 30 cm) y las constantes de humedad del mismo, se realizó el respectivo balance hídrico del suelo de la sub-parcela de estudio con base en la ecuación 11. La dinámica temporal de los componentes del balance hídrico de la sub-parcela de estudio se presenta en la Figura 27 y sus cantidades semanales y mensuales durante el período de estudio (octubre 2023 - abril 2024) se resumen en el anexo M.

Durante el periodo de seguimiento se presentó una temporada de lluvia y de sequías, en donde la temporada de lluvia (octubre y noviembre 2023), se observó un incremento significativo en la humedad del suelo en comparación con los meses posteriores. Este aumento alcanzó valores de hasta $0.711 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ y de $0.583 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ para el primer y segundo estrato respectivamente, debido a un evento de precipitación de alta intensidad de (37.2 mm/h) el día 4 de noviembre de 2023. Sin embargo, el pico más alto de humedad se registró el día 25 de noviembre como resultado de una actividad de riego, elevando la

humedad del suelo a valores de hasta $0.730 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ y $0.591 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ para el primer y segundo estrato respectivamente, evidenciando valores de humedad superiores al límite de capacidad de campo para ambas profundidades y de saturación solo para la primera profundidad (ver Figura 21).

Figura 21.

Seguimiento de la humedad del suelo de estudio.



Fuente: Autor

Nota: Pp: Precipitación; R: Riego; ETC: Evapotranspiración de cultivo; θ_1 : Cambios de la humedad del suelo a 15 cm; θ_2 : Cambios de la humedad del suelo a 30 cm; ΔSWC : cambios en el almacenamiento de agua en el suelo; TWA: agua total disponible; AFA: Agua fácilmente aprovechable por el cultivo.

Por otro lado, durante la temporada de sequías (diciembre 2023 – marzo 2024) se evidencia una reducción considerable de la humedad del suelo, alcanzando valores de hasta $0.285 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ y $0.448 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para el primer y segundo estrato para el día 27 de enero del 2024. La reducción significativa de la humedad del suelo se generó debido a la falta de entradas considerables de agua durante un periodo de 11 días, sumado a que durante esta temporada de sequías la E_{To} fue la más alta, con un promedio de 3.68 mm/día . Lo mencionado anteriormente generó que el agricultor redujera la frecuencia del riego, debido a la escasez de lluvias y a los bajos niveles del lago.

La diferencia promedio entre la E_{Tc} del cultivo de cebolla larga y la suma de la precipitación y el riego fue de $1.48 \pm 9.73 \text{ mm/día}$, la alta variabilidad en este resultado se atribuye a la aleatoriedad del riego por parte del agricultor, además de las temporadas de lluvia y de sequías. Además, la E_{Tc} del cultivo de cebolla larga representó el 67.22 % del agua aportada en forma de precipitación y riego en la subparcela, lo que sugiere que, en general, las entradas de agua superaron las pérdidas por E_{Tc} . Sin embargo, este resultado se debe principalmente a las altas precipitaciones registradas en octubre de 2023 y marzo de 2024, con diferencias promedio de $3.35 \pm 6.69 \text{ mm/día}$ y $3.02 \pm 9.37 \text{ mm/día}$, respectivamente. En contraste, en febrero de 2024, el promedio de la diferencia fue negativo ($-0.83 \pm 6.67 \text{ mm/día}$). Además, como se mencionó previamente, debido al bajo contenido de carbono orgánico (COS) y la textura predominantemente arenosa, estos excedentes de agua de los meses de lluvias no se almacenaron en el suelo, sino que se perdieron en forma de percolación, flujo subsuperficial o escorrentía. En cuanto al riego, este representó el 51 % del total de las entradas brutas de agua durante el período de monitoreo, siendo la única fuente de aporte en enero de 2024 (100

%) y sin contribuciones en octubre de 2023 (0 %).

La humedad del suelo en el primer estrato presentó un comportamiento altamente dinámico en comparación con el segundo estrato. Este fenómeno puede estar relacionado con la acumulación (precipitación y riego), y salidas (escorrentía y evapotranspiración) del agua en la superficie del suelo, además de las actividades agrícolas como el aporque y el movimiento del suelo, que generan flujos preferenciales (Gómez, 2022). Durante los 144 días de monitoreo, la humedad en el primer estrato estuvo por debajo del punto de marchitez permanente ($\theta_{PMP} = 44.27\%$) el 44.8% del tiempo, mientras que en el segundo estrato nunca descendió por debajo de este punto ($\theta_{PMP} = 37.36\%$). En cuanto a la capacidad de campo, la humedad del primer estrato superó este valor ($\theta_{cc} = 48.39\%$) el 19.12% del tiempo, mientras que en el segundo estrato siempre se mantuvo por encima de la capacidad de campo ($\theta_{cc} = 41.62\%$).

La variabilidad temporal en los cambios del almacenamiento de agua en el suelo fue considerablemente alta durante el período de monitoreo (Figura 21). En promedio, los cambios en el almacenamiento hídrico fueron de -9.8 mm/día, con valores máximos negativos de hasta -32.73 mm/día durante los meses lluviosos de octubre y noviembre de 2023, y máximos positivos de hasta 13.12 mm/día en enero de 2024. Los valores negativos reflejan un contenido de humedad superior a θ_{cc} posterior a eventos de alta precipitación o riego, mientras que los valores positivos indican la lámina de agua necesaria para devolver el suelo a su estado de humedad a θ_{cc} . Los valores de 0.0 mm/día fueron escasos, ocurriendo únicamente a finales de enero, principios de febrero y comienzos de abril, debido a la ausencia de precipitaciones en la zona.

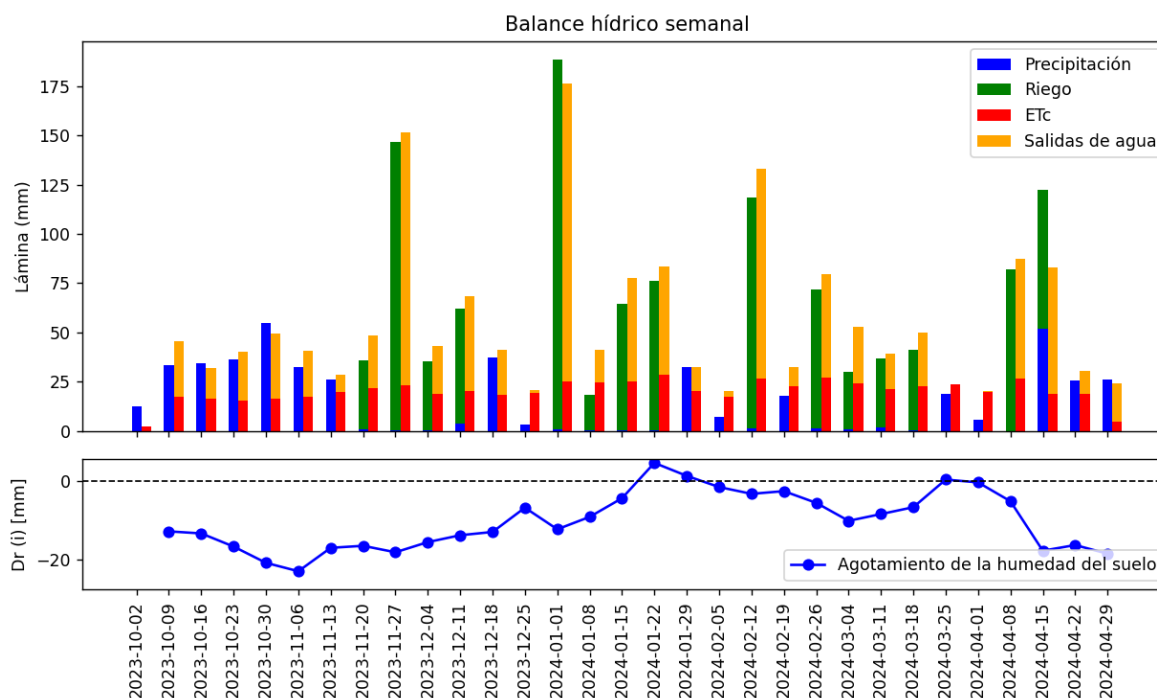
Como se observa en la Figura 22, además de las Tablas M1 y M2 (Anexo M), se registraron altos valores de salida de agua del suelo (percolación, flujo subsuperficial o

escorrentía) en comparación con las entradas (precipitación y riego), esto en respuesta de la baja capacidad de retención de agua en el suelo cultivado (aproximadamente un 4.0%). Por otro lado, existan posibles entradas de agua no cuantificadas como podría ser la niebla y el fenómeno de precipitación horizontal (también conocida como precipitación oculta), los cuales desempeñan un papel importante en la ecohidrología de los bosques tropicales de alta montaña y pueden contribuir con una cantidad adicional en la precipitación (Aparecido et al., 2018), así como la generación de caudales al recargar el almacenamiento de agua en el suelo (Clark et al., 2014). En donde estos pueden llegar a representar el 7% de la precipitación total anual durante los meses más secos y en algunos casos hasta el 22% (Cárdenas et al., 2017; Mosquera et al., 2023)

La ausencia de registros de precipitación horizontal es debido a que los equipos de medición de precipitación de tipo balancín, no captan en su totalidad las precipitaciones de muy baja intensidad (llovizna), lo cual puede generar una medición errónea de la precipitación real de la zona (V. Gómez, 2022). Sin embargo, estudios sobre la interceptación de niebla en páramos de Colombia y Ecuador, dominados por pastos en macolla de baja altura, sugieren que la niebla no llega al suelo y, por lo tanto, no contribuye directamente al balance hídrico (Berrones et al., 2021). No obstante, para la cuantificación de la lluvia horizontal de la zona y su aporte a la humedad del suelo es necesario llevar a cabo investigaciones adicionales.

Figura 22.

Representación gráfica de las entradas y salidas de agua en el suelo a escala semanal.



Fuente: Autor

6.3.2. Estimación de los indicadores de gestión del agua para riego

A escala semanal ($n = 31$), los valores promedio obtenidos para los indicadores fueron de 2.9 ± 8.41 , 2.0 ± 1.75 y 0.6 ± 0.95 para RIS, RWS y RRS, respectivamente; mientras que, a escala mensual ($n = 7$), los resultados promedio fueron de 2.7 ± 1.85 , 2.1 ± 0.43 y 0.5 ± 0.70 , en el mismo orden. La alta variabilidad del indicador RIS se puede atribuir al calendario de riego adoptado por el agricultor, el cual su práctica se realiza de manera empírica. La estimación de estos indicadores permitió establecer la relación entre los requerimientos hídricos del cultivo de cebolla larga y la oferta hídrica para suplir esta demanda. En el caso del RIS, los resultados fueron superiores al promedio mundial anual (RIS = 0.89), sin embargo, fueron similares al estimativo del promedio anual latinoamericano

(RIS = 2.93) y menores al estimativo promedio anual nacional (RIS = 3.58) (Benavides, Hernández, et al., 2021). Esto puede deberse a que el indicador RIS está significativamente influenciado por varios factores, como la precipitación, la tecnología del sistema de riego y la ubicación geográfica de la zona (Benavides, Hernández, et al., 2021). En el contexto de este estudio, las precipitaciones contribuyeron considerablemente a satisfacer las demandas hídricas del cultivo, especialmente durante los meses lluviosos.

La Tabla 16 presenta los resultados de los indicadores de gestión del agua para riego entre octubre de 2023 y abril de 2024 a escala semanal, donde se evidencia que el agricultor regó en 15 de las 31 semanas monitoreadas. Esto sugiere que, durante aproximadamente la mitad del tiempo, el agricultor no consideró necesario aplicar riego, especialmente durante la temporada de lluvias (octubre y mediados de noviembre de 2023). Este patrón confirma la estrategia de riego basada en la ausencia de precipitaciones en el periodo de una semana descrita en los resultados de la fase I. Para la interpretación de la Tabla 16, se consideraron los siguientes rangos: los valores de RWS entre 0.9 y 1.2 se clasifican como adecuados; valores inferiores a este rango indican déficit hídrico, mientras que valores superiores reflejan exceso hídrico (Al Zayed et al., 2015). En cuanto al indicador RIS, valores menores a 1.0 se interpretan como riego inadecuado, mientras que valores superiores representan un exceso de riego. Cabe mencionar que, en ausencia de eventos de riego, este indicador se excluye del análisis, dado que está relacionado directamente con la lámina de agua aplicada. Finalmente, el RRS refleja la proporción de precipitación que contribuyó a satisfacer la demanda hídrica del cultivo.

Tabla 16.*Valores semanales de los indicadores de rendimiento hídrico en la zona de estudio.*

Semana	R	Pp	Pe	ETc	RIS	RWS	RRS	Observación RIS	Observación RWS
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)					
2/10/2023	0	45.9	33	17.9	0	1.82	1.82	-	Exceso hídrico
9/10/2023	0	33.5	27	17.5	0	1.56	1.56	-	Exceso hídrico
16/10/2023	0	34.3	33	16.3	0	2.05	2.05	-	Exceso hídrico
23/10/2023	0	36.3	34	15.6	0	2.21	2.21	-	Exceso hídrico
30/10/2023	0	54.9	53	16.3	0	4.13	4.13	-	Exceso hídrico
6/11/2023	0	32.6	20	17.5	0	1.14	1.14	-	Adecuado
13/11/2023	0	26.1	23	20.1	0	1.16	1.16	-	Adecuado
20/11/2023	35.1	0.9	0	21.6	1.62	1.62	0	Exceso de riego	Exceso hídrico
27/11/2023	146.4	0.4	0	23.4	6.26	6.26	0	Exceso de riego	Exceso hídrico
4/12/2023	35.1	0.2	0	19	1.84	1.84	0	Exceso de riego	Exceso hídrico
11/12/2023	58.6	3.6	0	20.2	2.91	2.9	0	Exceso de riego	Exceso hídrico
18/12/2023	0	37.3	11	18.2	0	0.58	0.58	-	Escasez hídrica
25/12/2023	0	3.3	0	19.2	0	0.01	0.01	-	Escasez hídrica
1/01/2024	187.4	1	0	25.3	7.42	7.42	0	Exceso de riego	Exceso hídrico
8/01/2024	17.6	0.6	0	24.5	0.72	0.72	0	Falta de riego	Escasez hídrica
15/01/2024	64.4	0.2	0	25.3	2.54	2.54	0	Exceso de riego	Exceso hídrico
22/01/2024	76.1	0.2	0	28.5	2.67	2.67	0	Exceso de riego	Exceso hídrico
29/01/2024	0	32.7	20	20.3	0	1.01	1.01	-	Adecuado
5/02/2024	0	7.1	0	17.3	0	0.01	0.01	-	Escasez hídrica
12/02/2024	117.1	1.5	0	26.5	4.42	4.42	0	Exceso de riego	Exceso hídrico
19/02/2024	0	17.7	0	22.7	0	0.01	0.01	-	Escasez hídrica
26/02/2024	70.3	1.4	0	27	2.6	2.6	0	Exceso de riego	Exceso hídrico
4/03/2024	29.3	0.8	0	24.1	1.22	1.22	0	Exceso de riego	Exceso hídrico
11/03/2024	35.1	1.7	1	21.4	1.68	1.67	0.03	Exceso de riego	Exceso hídrico
18/03/2024	41	0.4	0	22.7	1.8	1.8	0	Exceso de riego	Exceso hídrico
25/03/2024	0	18.9	9	23.6	0	0.37	0.37	-	Escasez hídrica
1/04/2024	0	5.7	0	19.9	0	0	0	-	Escasez hídrica
8/04/2024	82	0	0	26.6	3.09	3.09	0	Exceso de riego	Exceso hídrico
15/04/2024	70.3	52	17	18.8	47.73	4.66	0.92	Exceso de riego	Exceso hídrico
22/04/2024	0	25.9	15	18.7	0	0.78	0.78	-	Escasez hídrica
29/04/2024	0	26.2	8	4.7	0	1.62	1.62	-	Exceso hídrico
Total	1065.8	503.3	304	640.6	-	-	-		
Promedio	34.4	16.2	10	20.7	2.9	2.0	0.6		
Desviación estándar	47.6	17.6	14	4.56	8.41	1.75	0.95		

Nota: R: lámina de riego; Pp: precipitación; Pe: precipitación efectiva; ETc: evapotranspiración de cultivo; RIS: suministro relativo de riego; RWS: suministro relativo de agua; RRS: suministro relativo de precipitación; “-“: No aplica.

En cuanto a la precipitación total acumulada durante el periodo de seguimiento, fue de 503.3 mm con un promedio semanal de 16.2 ± 17.6 mm, siendo octubre el mes con mayores precipitaciones. No obstante, la P_e , valor que refleja la cantidad de agua que contribuye a la humedad del suelo, fue menor, con un total de 304.0 mm y con promedio semanal de 9.8 ± 13.9 mm. El bajo valor de P_e podría estar relacionado con la rápida saturación del suelo y la pérdida de agua por escorrentía superficial, como se mencionó en los resultados de las constantes de humedad en los resultados de la fase II. Durante las semanas más secas, las cuales se presentaron durante enero y febrero de 2024, la P_e fue prácticamente nula debido a la falta de precipitación (< 1 mm/día), necesarias para aumentar la humedad del suelo. La ET_c fue de 640.6 mm (promedio de 20.7 ± 4.6 mm/semana), con valores elevados durante la temporada de sequías (enero-marzo de 2024), influenciados por el fenómeno de El Niño experimentado a inicios del 2024 en Colombia. Por último, el riego total de la temporada fue de 1065.8 mm con un promedio semanal de 34.4 ± 47.6 mm, en donde la actividad fue más frecuente durante los meses de sequías en comparación con los meses de lluvias.

En términos de suministro de agua, los indicadores RIS, RWS y RRS reflejan el balance entre la oferta de agua y las necesidades hídricas del cultivo. De manera general, la gestión del riego en la zona fue inadecuada, según los rangos recomendados por varios autores. Kibret et al. (2021) sugiere que el rango de valores de RIS entre 0.90 y 1.10, ya que este indicador determina si se satisfacen las necesidades hídricas del cultivo no cubiertas por las precipitaciones. En cuanto al RWS, Levine (1982) recomienda un rango de 0.9 a 1.2, aunque Levine propone un umbral mínimo de 1.5, en donde valores por debajo evidencian una limitación en la disponibilidad de agua para el cultivo. Por otro lado, Molden et al.

(1998), señala que valores de RWS superiores a 2.0 reflejan una adecuada disponibilidad hídrica. Finalmente, el indicador RRS no posee un rango específico, ya que este informa la fracción de demanda hídrica cubierta por la precipitación.

Tomando como referencia los rangos de los indicadores mencionados anteriormente, a escala semanal el valor del RIS no se encontró dentro del rango recomendado. Sin embargo, el 51.6% del tiempo, este indicador registró un valor de cero, lo que refleja que en este porcentaje de tiempo las necesidades hídricas del cultivo dependieron en su totalidad de las precipitaciones. Por otro lado, un 45.2% de las semanas los valores fueron superiores a 1.10, con un promedio semanal de 2.9 ± 8.4 indicando que el agua aplicada excede hasta casi tres veces, la demanda evaporativa del cultivo. Lo que demuestra un exceso en la aplicación de riego en los cultivos de cebolla larga debido al desconocimiento de las condiciones climáticas.

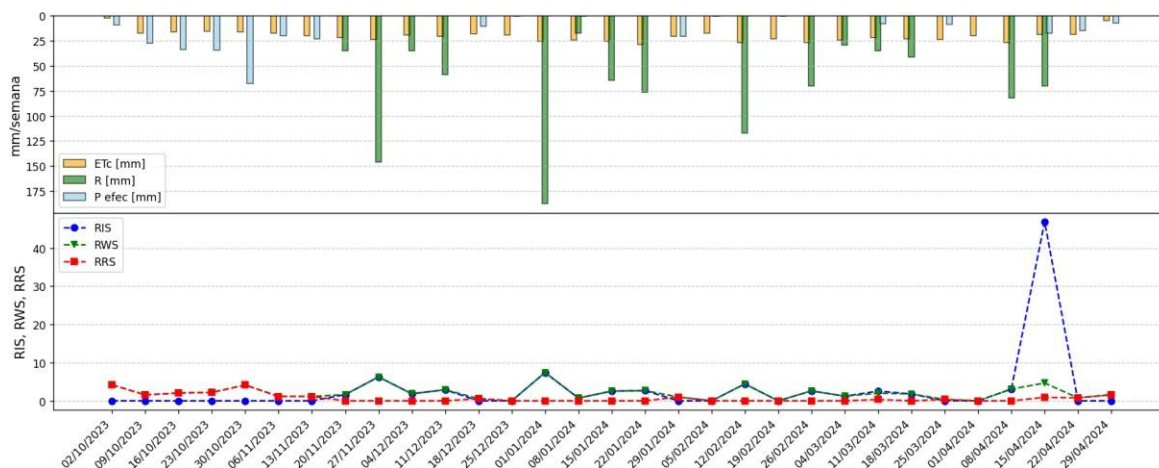
Para el caso máximo de 47.7 en la semana del 15 de abril de 2024, este valor sobresaliente se generó debido a que la precipitación efectiva acumulada de la semana cumplió en gran medida con las demandas hídricas del cultivo, sin embargo, previo a la precipitación el agricultor ya había realizado el riego, lo que provocó un valor excesivamente alto del RIS. Por último, se encontró que en la temporada de sequías se presentó un período máximo de dos semanas sin riego, además, que una posible explicación para los valores de RIS mayores a 1.10 es debido a que, en algunos casos, días posteriores a la aplicación de riego en la misma semana se presentaron precipitaciones, lo cual generó un exceso de recurso hídrico destinado al cultivo.

Por otro lado, durante las semanas que no se presentaron actividades de riego, los valores de RWS y RRS fueron iguales, esto debido a que la fuente hídrica principal correspondió a la precipitación. Sólo durante 8 de las 31 semanas de monitoreo el valor de RRS fue cero, indicando que en este periodo de tiempo no se presentaron aportes de agua al cultivo en forma de precipitación. El valor máximo de este indicador fue de 3.22 y se presentó el día 30 de octubre de 2023 producto de una precipitación acumulada de 54.9 mm/ semana, esto refleja que la precipitación fue suficiente para cubrir más de tres veces las necesidades hídricas del cultivo.

En el caso del indicador RWS, éste se mantuvo por debajo de 0.90 durante el 25.8% del tiempo (8 semanas), lo que indica que en esas semanas el agricultor dependió completamente de la precipitación o el riego fue insuficiente para cubrir las demandas hídricas del cultivo. Por otro lado, el valor de RWS superó 1.50 en el 61.8% del tiempo (19 semanas) y sobrepasó 2.0 en el 38.7% (12 semanas), lo que sugiere que el cultivo cuenta con una disponibilidad hídrica adecuada la mayor parte del tiempo. El valor máximo del indicador se registró el 2 de octubre de 2023, alcanzando 4.28, como resultado de una dependencia casi total del riego. Las variaciones entre los indicadores semanales y las entradas y salidas de agua se presentan en la Figura 23, en donde se observa que los altos valores de RIS y RWS concuerdan con los picos de riego y ausencias de precipitación.

Figura 23.

Variación de los indicadores RIS, RWS y RRS a escala semanal.



Fuente: Autor.

Nota: ETC: evapotranspiración de cultivo; R: lámina de riego aplicada; P efec: lámina de precipitación efectiva.

A nivel mensual (Anexo N), los indicadores evidenciaron ineficiencia en la gestión del agua para riego. En noviembre 2023, el RIS, que evalúa la proporción de agua de riego aplicada respecto a la demanda neta del cultivo, alcanzó un valor alto de 6.5. Una posible explicación se debe a que la temporada de lluvias se extendió hasta mediados de noviembre, mientras que las sequías comenzaron a finales del mes, sumado al riego realizado a finales de mes debido al criterio de riego del agricultor basado en la ausencia de lluvias semanales, generaron un exceso hídrico en comparación con las demandas hídricas del cultivo.

En cuanto al indicador RWS (Tabla N1, anexo N), todos los valores mensuales superaron 1.5, lo que, según Levine (1982) indica que la zona el cultivo de cebolla larga presentó un exceso de disponibilidad hídrica, tanto para la temporada de lluvias como en la de sequías. En enero de 2024, los valores de RWS y RIS fueron similares, lo que sugiere que, durante este mes, el aporte hídrico al cultivo de la zona se basó netamente en el riego.

Por otro lado, en relación con el indicador RRS, se observó que solo en los meses de octubre y noviembre las demandas hídricas del cultivo fueron completamente satisfechas por las precipitaciones, coincidiendo con la temporada de lluvias. Con la llegada de la temporada de sequías, los aportes de precipitación representaron, en promedio, el 18% de la demanda hídrica mensual del cultivo. Al comparar los resultados de los indicadores a escala semanal y con los mensuales, se observan importantes diferencias:

En el caso del indicador RIS, los valores mensuales no son tan elevados (con un máximo de 6.5) en comparación con los valores semanales (máximo de 47.7). Esto se debe a que, a nivel mensual, los ingresos variables de agua (precipitación y riego) tienden a equilibrarse con las salidas constantes (ETc), lo que genera una falsa percepción de uso eficiente del recurso hídrico. Sin embargo, a nivel semanal, es posible identificar con mayor detalle las semanas en las que el riego fue insuficiente para el cultivo. Investigaciones como la de Shongwe & Tsabedze (2021) señalan que, al evaluar el indicador en escalas más pequeñas ayudan a mejorar la eficiencia del recurso hídrico, debido a que descubrieron que evaluar el RIS a nivel anual, el riego parecía adecuado, mientras que los valores mensuales del RIS revelaron que el cultivo estaba sobreirrigado la mayor parte del tiempo, esto debido a que la estimación del RIS empleando datos anuales no detecta los periodos de escasez hídrica (Andrés & Cuchí, 2014).

Los investigadores atribuyen los altos valores de RIS a la adopción de calendarios de riego con láminas constantes, los cuales no consideran aspectos como la etapa de crecimiento del cultivo, la temporada de lluvias de la zona y el estado de los instrumentos de riego (Haj-Amor et al., 2018; Moursy & Wasfy, 2022; Shongwe & Tsabedze, 2021). Esto coincide con el caso de la presente investigación, donde el único criterio del agricultor es la ausencia de

lluvias durante una semana. Por último, el RIS no muestra una tendencia general basada en el tipo de suelo, pero los valores más altos se encuentran en campos con suelos de muy baja capacidad de retención de agua disponible (Andrés & Cuchí, 2014). Esto también concuerda con la presente investigación, ya que el agricultor realiza otras actividades en simultáneo con el riego y, dado que el suelo no posee una buena capacidad de retención de agua (en promedio 4%), se generan altas tasas de aplicación de riego en donde gran parte del agua se pierde en forma de escorrentía superficial, percolación o flujos sub-superficiales.

El indicador RWS permite determinar si la cantidad total de agua (proveniente tanto del riego como de la lluvia) entregada al cultivo durante su ciclo vegetativo ha sido excesiva, suficiente o deficiente (Haj-Amor et al., 2018). El valor de RWS aumenta de manera proporcional al incremento de la precipitación o del riego. No obstante, es importante destacar que en situaciones donde la precipitación en la zona es relativamente baja y se obtienen valores altos de RWS ($RWS > 1.5$), esto puede indicar un exceso en el suministro de agua.

A escala mensual, se observa que febrero presentó el valor más bajo de RWS, lo cual se atribuye a la reducción de las precipitaciones y al bajo nivel del lago durante ese mes. La incertidumbre respecto a la duración del fenómeno de El Niño también contribuyó a que el riego fuera menor en comparación con los meses anteriores, lo que provocó una disminución del indicador. En contraste para ese mismo mes, a nivel semanal, el valor máximo de RWS alcanzó 4.42, resultado de una alta tasa de aplicación de riego de 117 mm/semana. Algunos autores atribuyen los altos valores de RWS durante temporadas de sequías al mal estado de los equipos de riego (aspersores y goteras) y de transporte (canales y tuberías), así como a malas prácticas agrícolas, como los prolongados tiempos de riego que no responden a las

necesidades hídricas del cultivo (Haj-Amor et al., 2018; Hakuzimana & Masasi, 2020). Otra posible explicación asociada a las temporadas de lluvias es que, al percibirse una mayor disponibilidad hídrica, la eficiencia del sistema de riego disminuye debido a la abundancia del recurso (Al Zayed et al., 2015).

Los indicadores de RWS y RRS muestran promedios similares en ambas escalas de tiempo. Sin embargo, al analizar los resultados, se observa que, aunque la tabla mensual resalta la contribución del riego en octubre, la tabla semanal indica que el RRS presenta valores más elevados en semanas específicas. Esto evidencia la relevancia de las lluvias esporádicas en la dinámica hídrica. Durante la temporada de lluvias, solo en octubre se presentaron aportes significativos a la demanda hídrica del cultivo según la tabla mensual. En contraste, la tabla semanal revela que, durante todo octubre, así como en parte de noviembre y la primera semana de febrero, la precipitación fue suficiente para satisfacer la totalidad de las demandas hídricas del cultivo (Tabla 16). Así, la tabla mensual ofrece una visión más general de la gestión hídrica, mientras que la tabla semanal destaca los períodos de escasez y exceso hídrico.

Al comparar los resultados del indicador RRS con otras zonas, por ejemplo, con el mediterráneo, estas son en promedio menor a uno (Canales et al., 2019; Moreno & Roldán, 2013; Roldán et al., 2011), lo cual indica que la precipitación no contribuye en gran medida a las demandas hídricas del cultivo. Para el caso particular de Colombia, Grajales (2017) reportó valores promedio de RRS de hasta 2.05 para el cultivo de aguacate Hass (*Persea americana*) para tres zonas productoras de Colombia (Tolima, Cauca y Antioquia), indicando que la precipitación aporta hasta dos veces las demandas hídricas del cultivo.

La precipitación promedio en Colombia se encuentra entre los 2000 y 3000 mm/año (IDEAM, 2023), lo que sugiere que, para el contexto colombiano, la precipitación puede contribuir de manera significativa al suministro hídrico. Sin embargo, la distribución de las lluvias no es uniforme: mientras que las áreas hidrográficas Caribe y Magdalena-Cauca tienen un régimen bimodal, las regiones del Amazonas, Orinoco y Pacífico presentan un régimen monomodal, lo que limita la posibilidad de depender exclusivamente de las precipitaciones para satisfacer las demandas hídricas de los cultivos (IDEAM, 2023). Por tanto, es necesario implementar estrategias de gestión del agua, como la recolección de aguas lluvias y/o la mejora de la eficiencia de los sistemas de riego, para garantizar un suministro hídrico constante y mitigar la vulnerabilidad de los cultivos frente a la variabilidad climática.

6.3.3. Estimación de indicadores de eficiencia del sistema de riego

A continuación, se presentan los resultados de las evaluaciones del sistema de riego implementado con el objetivo de determinar la eficiencia de las aplicaciones de agua en la zona estudiada. Estos indicadores fueron obtenidos mediante mediciones de campo, bajo las condiciones meteorológicas y operativas del sistema de riego actual. En el anexo O se localizan los datos crudos de las evaluaciones de la eficiencia del riego, además de las condiciones meteorológicas de estos. La Tabla 17 presenta un resumen de las evaluaciones, detallando las fechas de observación, el estado del clima durante cada evaluación, y los principales parámetros de operación de los aspersores utilizados.

Tabla 17.

Condiciones operacionales y meteorológicas promedio de las evaluaciones realizados.

No.	Fecha	Q	P	T	SRD	WNG	WNS	TMP	HR	WND
		(L/min)	(kPa)	[min]	[W/m ²]	(m/s)	(m/s)	(°C)	(%)	Grados
1	1/03/2024	8.9	100	173	624.3	4.1	1.6	11.6	73	213.4
2	13/03/2024	10	115	156	665.2	5.8	2.7	14.8	75.9	216.8
3	16/07/2024	10	110	138	1219.8	6.2	3.4	16.4	70.6	152.8
Promedio		9.6	108.3	155.7	836.4	5.4	2.6	14.3	73.1	194.3
Desviación estándar		0.5	6.2	14.3	271.6	0.9	0.7	2.0	2.2	29.4

Nota: Q: caudal; P: presión de trabajo del aspersor; T: Tiempo de operación; SRD: Radiación solar; WNG: velocidad ráfaga del viento, WNS: velocidad promedio del viento, TMP: temperatura ambiente; HR: humedad relativa; WND: Dirección del viento medida desde el norte.

El caudal y la presión de operación del aspersor osciló entre los 8.9 y 10 L/min; y los 100 a 115 kPa respectivamente; las velocidades del viento fluctuaron entre 1.6 y 3.4 m/s, con ráfagas de viento de hasta 6.2 m/s; por último, los valores de temperatura ambiente se situaron entre 11.6 y 16.4. Tomando como referencia las especificaciones técnicas del aspersor en estudio, este opera de manera óptima a una presión de 1.5 atm (152 kPa), junto con un caudal de aproximadamente 17.06 L/min. Sin embargo, al compararlo con las condiciones de operación medidas durante las evaluaciones del sistema de riego, se observó que estos funcionan con una presión 28.8% inferior a la recomendada, lo que provoca una disminución tanto en el caudal de salida como en el radio de alcance del aspersor.

Una posible explicación de los bajos niveles de presión en los aspersores, como se indicó en los resultados de la fase I, es la operación simultánea de múltiples aspersores sin considerar aspectos técnicos, además del empleo de distintos tipos de aspersores y el uso de una sola motobomba para todo el sistema de riego. Estos factores generan variaciones en las tasas de flujo y en las presiones de operación de cada aspersor. En cuanto al tiempo promedio

de riego de las evaluaciones, este fue superior al promedio de tiempo de riego en la zona en 20 minutos (136.6 minutos, Tabla 9).

La Tabla 18 presenta los resultados de los indicadores de eficiencia del sistema de riego implementado (CUC, CUD y WDL), para las tres evaluaciones realizadas en la zona de estudio. En complemento, la Figura 31 ilustra gráficamente la distribución de las láminas de aplicación de riego durante estas pruebas, junto con la dirección predominante del viento en cada evaluación. En las superficies de distribución de riego, los diferentes colores y las variaciones en altura representan distintos niveles de lámina en los vasos pluviométricos empleados. Las zonas de mayor elevación y color más intenso indican láminas de aplicación superiores, mientras que las zonas de menor altura sugieren láminas más bajas, señalando una posible irregularidad en la aplicación del riego.

Tabla 18.

Resultados de los indicadores de eficiencia del sistema de riego implementado.

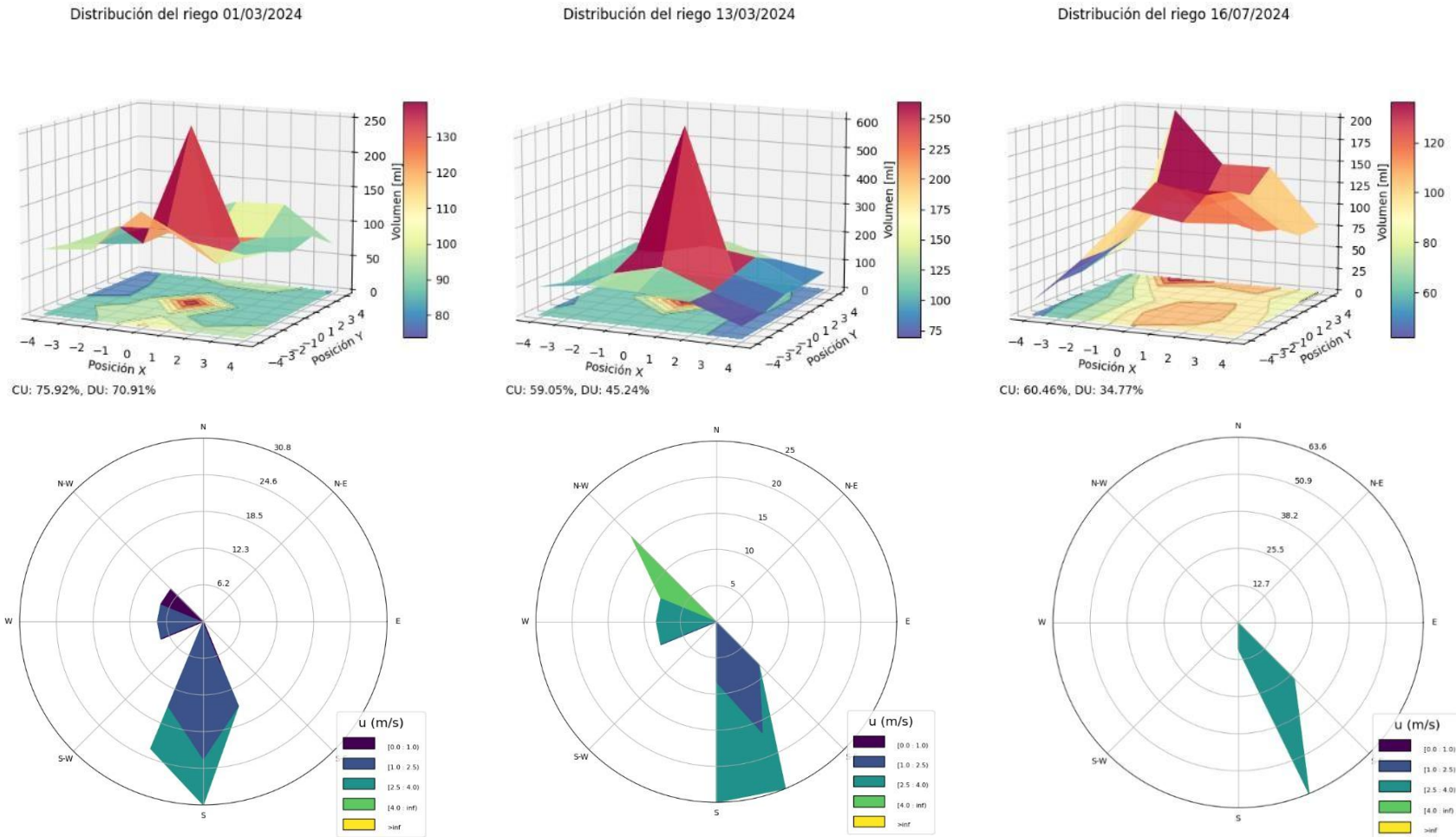
No.	Hora prueba	T [min]	TMP (°C)	WNG (m/s)	WNS (m/s)	P (kPa)	CUC (%)	CUD (%)	WDEL (%)
1	8:30 a.m.	173	11.6	4.08	1.58	100	75.9	70.9	9.56
2	9:15 a.m.	156	14.8	5.79	2.71	115	59.1	45.2	10.5
3	10:20 a.m.	138	16.4	6.21	3.41	110	60.5	34.8	22
Promedio		155.7	14.3	5.36	2.57	108	65.2	50.6	14
Desviación estándar		14.3	2.0	0.9	0.8	6.2	7.6	15.2	5.7

Nota: T: Tiempo de operación; CUC: coeficiente de uniformidad de Christiansen; CUD: Coeficiente de uniformidad de distribución; WDEL: pérdidas por evaporación y arrastre del viento; Q: caudal; P: presión de trabajo del aspersor; WNS: velocidad media del viento; WNG: velocidad media ráfaga del viento; TMP: Temperatura ambiente.

Basado en los resultados de las evaluaciones, el sistema en general es ineficiente ($CUD < 80\%$), con una uniformidad de riego pobre ($CUC < 70\%$), y con altas pérdidas de agua ($WDL > 10\%$). Al analizar las evaluaciones individualmente, la primera evidenció un CUC aceptable ($80\% < CU < 70\%$), por otro lado, las demás se consideran inaceptables ($< 60\%$). Continuando con CUD, en todas las evaluaciones se considera como ineficiente ($CUD < 80\%$). Por último, en cuanto al WDEL, las dos primeras evaluaciones las pérdidas fueron de aproximadamente el 10%. No obstante, la última evaluación las pérdidas aumentaron hasta un 22% posiblemente por acción del viento ya que en esta última evaluación la velocidad del viento fue mayor en un 54% y 21% en comparación con las evaluaciones anteriores.

Figura 24.

Representación gráfica distribución de aplicación del riego durante las tres pruebas de eficiencia.



Nota: Cada gráfico muestra la distribución del volumen aplicado en mililitros según la posición. Además, se presenta la velocidad y dirección predominante del viento en cada una de las evaluaciones.

Entre los posibles causantes de estos bajos niveles de eficiencia del sistema de riego por aspersión, múltiples investigadores concuerdan que la velocidad y dirección del viento, son considerados como los parámetros más influyentes en estos tipos de sistemas de riego (Cavero et al., 2016; Faryabi et al., 2020; Maroufpoor et al., 2019; Moursy & Wasfy, 2022). Este fenómeno es causado por los fuertes vientos que dispersan las gotas de agua provenientes del aspersor, generando áreas con exceso y otras con escasez de agua, lo que resulta en una uniformidad deficiente. Un ejemplo claro de este fenómeno se observa en la tercera evaluación (16 de julio de 2024, Figura 24), donde la uniformidad fue deficiente debido a la concentración de la lámina de riego en la parte inferior derecha, coincidiendo con la dirección predominante del viento (Sudeste).

Otro posible factor que contribuyó a la baja eficiencia del sistema de riego es la hora a la que se realiza esta actividad. La hora del riego de las evaluaciones se llevaron a cabo entre las 8:30 y las 10:20 am, periodo de tiempo que coincide los máximos valores de velocidad del viento, temperatura ambiente y radiación solar (de 9:00 a 11:00 am, Figura L1, Anexo L). Según (Andrade et al., 2022), existe una relación entre la baja uniformidad del riego y las condiciones climáticas, como la temperatura, la humedad relativa, la radiación solar y la velocidad del viento. Estos autores encontraron una correlación significativa entre la disminución del CUC y el aumento de la velocidad del viento ($R = 0.75$). Además, hallaron una fuerte relación entre la velocidad del viento y la reducción del radio de alcance del aspersor ($R = 0.9418$). Por otro lado, el estudio realizado por (Yari et al., 2017) concluyó que los vientos superiores a 6.5 m/s tienen un efecto estadísticamente significativo en la aplicación uniforme del riego.

La última evaluación registró una temperatura superior a las de las evaluaciones previas, lo que probablemente contribuyó a la disminución de la eficiencia del riego. Según Moursy & Wasfy (2022), existe una relación directa entre el aumento de la temperatura ambiente y la reducción del CUD de hasta un 5.33%. Esta disminución se debe a que el aumento de la temperatura ambiente reduce la viscosidad del agua y aumentan la tasa de evaporación, lo que provoca una distribución desigual del riego y disminuye la eficiencia del sistema de aspersión.

En cuanto a pruebas de eficiencia del sistema de riego por aspersión realizadas en ecosistemas de alta montaña andina, Clavitea et al. (2023) encontraron que la hora del riego influye en su eficiencia: el riego realizado en la mañana (5:30 - 7:30) mostró un incremento en los valores del CUC del 11% y 12.5% en comparación con los riegos realizados al mediodía (12:00 - 14:00) y en la tarde (16:00 - 18:00), respectivamente. En cuanto al CUD, los valores al mediodía y en la tarde pueden ser hasta un 21.2% más bajos, atribuible al incremento de la velocidad del viento durante esas horas. Resultados similares se obtuvieron en la presente investigación, en donde la prueba realizada a las 8:30 a.m., registró una mayor eficiencia, con incrementos del 15.4% y 36% en los indicadores de CUC y CUD, respectivamente, en comparación con los resultados obtenidos en la prueba realizada a las 10:20 a.m. Sumado a lo presentado en la Tabla L1 (Anexo L), evidencian que la eficiencia del riego disminuye a medida que se acerca al pico horario de velocidad del viento y temperatura (entre las 10:00 am y 12:00 pm).

Además de los factores climáticos, los aspectos operativos de los sistemas de riego por aspersión pueden generar reducciones en su porcentaje de eficiencia. Como se mencionó en los resultados de la fase I, el desplazamiento y la separación de los aspersores se realiza

de manera manual y empírica (separación entre 4 a 5 pasos largos del agricultor), lo que resulta en una distribución deficiente debido a que no se consideran aspectos técnicos como el radio de alcance de los aspersores. Como se observa en la Figura 29, para la evaluación del 1 de marzo de 2024 (separación de 4.5 m aproximadamente), se aprecia un patrón de uniformidad influenciado por los aspersores adyacentes, lo que causó que para este caso los valores de uniformidad y distribución fueran los más altos ($CUC = 75.9\%$ y $CUD = 70.91\%$). En contraste, en las otras dos evaluaciones no se observa dicho patrón debido a una mayor separación entre los aspersores (5.5 y 6.0 m respectivamente para cada evaluación). Otro posible causante de la falta de este patrón puede ser que durante la segunda evaluación el aspersor de estudio presentó una avería en su base, lo que generó una fuga de agua causando una alta aplicación de agua en la base del aspersor y un pico en la uniformidad de distribución.

Distintos autores han demostrado que, a medida que se aumenta la distancia entre los aspersores, los valores de CUC y CUD disminuyen (Andrade et al., 2022; Faryabi et al., 2020; Flórez et al., 2013). Esto se debe a que se aumenta de forma hipotética el área de riego, pero el alcance del aspersor se mantiene constante, generando zonas sin aplicación de riego. Por otro lado, si los aspersores se instalan muy cerca unos de otros, puede producirse pérdidas de agua debido a la percolación y la evaporación causadas por la acumulación de agua en la superficie del suelo saturado, además de la pérdida de nutrientes por lixiviación. Esto no sólo afecta la eficiencia del sistema de riego, sino que también aumenta los costos operativos debido a que se deben instalar más aspersores u operar el sistema de bombeo por un tiempo más prolongado para cubrir el área de cultivos.

Por último, la falta de capacitación de los sistemas de riego y la percepción del estado de los cultivos por parte de los agricultores también tienen un impacto directo en la eficiencia

de los sistemas por aspersión. Investigadores como Maroufpoor et al. (2019) comentan que, cuando los agricultores presentan bajos rendimientos de cultivo, estos intentan compensar esta situación prolongando el tiempo de riego y aumentando la aplicación de agroquímicos. De manera similar, Rodríguez-Robayo et al. (2022) señala que los agricultores que carecen de formación técnica en buenas prácticas agrícolas tienden a realizar riegos más frecuentes y prolongados, lo que incrementa el consumo de agua en el sector agrícola. Estas prácticas no sólo disminuyen la eficiencia del sistema de riego, sino que también pueden tener impactos negativos en el medio ambiente y la salud humana.

7. Propuestas de mejora de la gestión del agua para riego en ecosistema de páramo

Con el objetivo de mejorar la eficiencia en el uso del recurso hídrico en la zona de estudio se plantean las siguientes recomendaciones, las cuales son propuestas con base a la situación actual de la unidad productiva, prácticas agrícolas locales, disponibilidad de espacio, y recursos, además de los indicadores de gestión del agua para riego:

Capacitación de los agricultores de la unidad productiva en la implementación de las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA): Una alternativa para mejorar la gestión del recurso hídrico de la zona es la implementación de las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), las cuales constituyen un conjunto de principios aplicados tanto a los procesos de producción como de posproducción en las unidades productivas, orientados a obtener productos agrícolas saludables y sostenibles desde una perspectiva económica, social y ambiental (FAO, 2016). Prácticas como la rotación de cultivos, el registrar y planificar el riego, entre otros, pueden mejorar la relación beneficio-costos en un 35%, en comparación con las prácticas tradicionales (Rodríguez-Robayo et al., 2022). Sin embargo, para que estas prácticas sean efectivamente adoptadas, es indispensable un acompañamiento técnico e institucional que permita su integración en las actividades actuales de los agricultores (Ruiz et al., 2015). Este apoyo es crucial para garantizar que las BPA sean acogidas por la comunidad y que su implementación no afecte negativamente la producción, de la cual los agricultores dependen económicamente.

Instalación de pluviómetro artesanal y tanque evaporímetro: Con el objetivo de estimar de manera práctica las entradas y salidas de agua en la zona, se recomienda la instalación de un pluviómetro artesanal junto con un tanque evaporímetro. No obstante, se hace mención que previo a la instalación de estos equipos es necesario capacitar al agricultor. El pluviómetro permitirá medir la cantidad de precipitación acumulada durante

los eventos de lluvia, proporcionando datos esenciales para la gestión del agua en la unidad productiva. Por otro lado, el tanque evaporímetro facilitará la estimación de la evapotranspiración (ETc) del cultivo, que es crucial para entender la demanda hídrica real en diferentes épocas del año.

Se recomienda la instalación de vasos pluviométricos dentro de la unidad productiva con el propósito de medir la lámina de riego aplicada. Esta información es fundamental para la realización de un balance hídrico en el suelo práctico, basado en la ecuación $P_p + R - ET_c =$ almacenamiento de agua en el suelo. Dicho balance permitirá optimizar la eficiencia del calendario de riego, ajustando las aplicaciones de agua a las necesidades reales del cultivo. Como referencia, el Anexo P incluye un ejemplo de calendario de riego diseñado a partir del balance hídrico del suelo, considerando las condiciones climáticas de la zona entre el 1 de enero y el 29 de abril de 2024.

Implementación de sistemas de medición de la humedad del suelo: La incorporación de herramientas como instrumentos de medición de la humedad del suelo a distintas profundidades será fundamental para optimizar el riego, ya que permitirán determinar la disponibilidad hídrica del cultivo almacenada en el suelo. Una alternativa de fácil implementación es el uso de tensiómetros, dispositivos que miden la presión de succión del suelo y que pueden traducirse en la humedad disponible. Lo anterior ayudará al agricultor a conocer si la humedad del suelo se encuentra por debajo del límite aceptable para el cultivo de cebolla larga, para posteriormente tomar la decisión informada de regar el cultivo y hasta cuándo se debe de regar. Estos instrumentos no solo facilitarán una gestión más precisa del riego, sino que también contribuirán a la sostenibilidad del recurso hídrico al minimizar el riesgo de sobreirrigación y asegurar que el cultivo reciba la cantidad

adecuada de agua en función de sus necesidades específicas y de la capacidad de retención de humedad del suelo.

Instalación de temporizadores graduados y adquisición de nuevos aspersores: dado que las tareas cotidianas del agricultor a menudo se llevan a cabo en paralelo con la actividad de riego, se recomienda la instalación de temporizadores graduados que se configuren según un tiempo de riego preestablecido, basado en las necesidades hídricas del cultivo. Tomando como base una lámina de agua fácilmente aprovechable (5.0 mm), tasa de aplicación de los aspersores (8.97 mm/h) y un porcentaje de pérdidas del 14%, se sugiere un tiempo de operación de aproximadamente 40 minutos, dado que el suelo tiene una baja capacidad de retención de humedad (4.18% en promedio). Sin embargo, el tiempo de riego propuesto anteriormente se basa en un factor de agotamiento del 30% recomendado para la cebolla (Allen et al., 2006), de manera para estimar de forma adecuada el tiempo de riego es necesario conocer la humedad del suelo previo a la actividad.

Además de la instalación de temporizadores, se sugiere la adquisición de nuevos aspersores, ya que los actuales presentan fallas que afectan la uniformidad del riego. La incorporación de un mayor número de aspersores, posicionados en lugares fijos con base a su área de riego, garantizará una adecuada uniformidad en la aplicación de la lámina de riego. Esto no solo mejorará la eficiencia del sistema, sino que también reducirá el tiempo dedicado a la práctica de riego, ya que se eliminará la necesidad de transportar y desmontar los aspersores de manera frecuente.

Acuerdos sobre el uso del agua: Con base a la actual expansión agrícola en la zona de estudio y la ubicación de la unidad productiva aguas abajo de una quebrada cercana, en donde múltiples agricultores captan agua para sus cultivos, se recomienda la implementación

de acuerdos locales sobre el uso del agua. Estos acuerdos ayudan a evitar la competencia por el acceso al recurso hídrico, promoviendo así un uso sostenible y equitativo para los diferentes usuarios de la fuente hídrica. Como señalan Gutiérrez-Malaxechebarría (2013) y Leroy (2019), la cooperación entre los agricultores y la gestión compartida del recurso hídrico son fundamentales para garantizar la disponibilidad de agua en el futuro, asegurando que todas las partes interesadas puedan satisfacer sus necesidades sin comprometer la sostenibilidad del ecosistema local.

Horario de riego: Con base a la caracterización meteorológica horaria de la zona de estudio, se sugiere realizar las actividades de riego durante las horas de la mañana (antes de las 10 a.m.) o en las horas avanzadas de la tarde (después de las 4 p.m.), ya que en esos períodos la velocidad del viento y la radiación solar son significativamente menores. Al regar en estas condiciones, se reduce las pérdidas de agua en forma de evaporación y arrastre del viento, además de mejorar la uniformidad en la aplicación de la lámina de riego (Andrade et al., 2022; Clavitea et al., 2023).

Frecuencias y láminas de riego: Tomando como referencia el balance hídrico realizado en el suelo a partir de los datos climáticos de la zona de estudio entre el 1 de enero y el 29 de abril de 2024 (ver Anexo P), se propone una frecuencia de riego aproximada de cada tres días, con una duración promedio de 101 minutos. Este cálculo considera una eficiencia del sistema de riego del 86%, determinada en evaluaciones de campo, asumiendo pérdidas del 14% por efectos del viento y la temperatura. Asimismo, se utilizó un coeficiente de cultivo (K_c) de 1.0 para la fase media del cultivo, según la guía FAO No. 56 para cebolla verde, un caudal de operación del aspersor que aplica una lámina de riego de 8.97 mm/hora, y una lámina de agua disponible en el suelo de 17.3 mm para los primeros 40 cm, basada en

la caracterización de las constantes de humedad del suelo de la subparcela.

El diseño del calendario de riego también incluye un factor de agotamiento del suelo estimado con la fórmula propuesta en la guía FAO No. 56. Para ejemplificar el manejo del riego, se consideró una fecha de cosecha hipotética del 1 de enero de 2025 y una duración del cultivo de 120 días. La precipitación y la ETo utilizadas provienen de datos monitoreados en la zona durante el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 29 de abril de 2024, permitiendo que el calendario propuesto se ajuste a las condiciones climáticas reales de la región.

La frecuencia de riego propuesta se basa en el estado de humedad del suelo del día anterior. Si la humedad disponible en el suelo (AFA) es inferior a la humedad medida el día previo es necesario regar; en caso contrario, no se realiza riego. La lámina de riego se calcula como la diferencia entre la humedad del suelo al final del día anterior y su capacidad de campo. En casos donde la humedad del suelo supera la capacidad de campo, este valor se ajusta a la capacidad de campo para el día siguiente, considerando que el exceso de agua se drena gravitacionalmente. Esto asegura que el calendario de riego optimice el uso del agua y mantenga las condiciones ideales para el cultivo sin generar saturación excesiva.

Se destaca que la recomendación del calendario de riego se fundamenta en la información recopilada durante el período de estudio. No obstante, para garantizar que los resultados no afecten negativamente al cultivo, es fundamental contar con una mayor cantidad de datos meteorológicos. Además, se sugiere la aplicación de un experimento de tipo cuadro latino, el cual permite validar el estado del cultivo bajo diferentes láminas de riego y en distintos períodos de aplicación, con el fin de optimizar la eficiencia del riego y minimizar posibles riesgos para la producción.

8. Conclusiones

Objetivo específico 1:

Con base al seguimiento de las prácticas de riego de una unidad productiva de cebolla larga entre las fechas de mayo de 2023 y febrero de 2024, se reveló una serie de conclusiones fundamentales en torno a la gestión del agua y su relación con las condiciones climáticas en el contexto de los páramos. En primer lugar, se identificó la precipitación como la principal fuente hídrica de la zona, con una media anual de 1300 mm. No obstante, los agricultores perciben una disminución progresiva en las lluvias durante las temporadas de sequías, agravada por la creciente irregularidad climática. Este fenómeno está estrechamente vinculado a las fluctuaciones del Índice Oceánico del Niño (ONI), que indica la prevalencia de fenómenos climáticos extremos, como El Niño y La Niña, responsables de intensas precipitaciones o sequías, respectivamente.

Lo anterior ha generado la dificultad de predecir las temporadas de lluvias y sequías en la zona por parte de los agricultores, causando que estos dependan de fuentes hídricas alternativas, como fuentes superficiales cercanas o reservorios (lago y tanque). Sin embargo, el uso de estas fuentes se ve limitado por desafíos logísticos y económicos, como por ejemplo los altos costos asociados al bombeo de agua desde la quebrada y/o lago, situación que se agrava durante los períodos de sequías.

En cuanto al sistema de riego implementado en la unidad productiva es por aspersión, una opción comúnmente recomendada debido a su capacidad para mejorar la eficiencia en la distribución del agua. No obstante, el sistema actualmente posee problemas como la falta de uniformidad en los modelos de aspersores y al deterioro de sus componentes, lo cual reduce

la eficiencia del riego. Además, el agricultor carece de instrumentos adecuados para medir la humedad del suelo, lo que lo lleva a realizar prácticas de riego basadas más en la percepción empírica que en datos precisos, lo cual genera aplicaciones de hasta 2.6 veces la demanda hídrica del cultivo. Esta dependencia de la intuición en la toma de decisiones incrementa la posibilidad de aplicar cantidades de agua inadecuadas, lo que, a su vez, puede afectar negativamente el desarrollo del cultivo y la sostenibilidad de la producción.

Objetivo específico 2:

Las características físico-químicas del suelo se encuentran dentro del rango recomendado para el cultivo de cebolla larga, según diversos investigadores: textura media (franca en promedio), pH cercano a 6.0, alta humedad (>40% en promedio durante la temporada), bajo contenido de sales (<2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), rico en carbono orgánico (> 5.7 g/kg), y una profundidad superior a 45 cm para el desarrollo libre de las raíces. Estos resultados pueden atribuirse a los factores de formación del suelo como al proceso de adecuación del suelo (procesos de arado, aplicación de abonos y fertilizantes) realizado por el agricultor para favorecer el desarrollo del cultivo.

En términos espaciales, se encontraron diferencias significativas en las propiedades del suelo debido a la textura más gruesa (franco arcillo arenoso) en la zona alta en comparación con la zona media y baja (franco arcillo y franco arcillo limoso), lo que resultó en menor porcentaje de Hm y ligero aumento de la Da, afectando la disponibilidad de agua. Temporalmente, solo se observaron diferencias significativas en las propiedades químicas (CE y COS) en la capa superficial (0-20 cm) de las zonas media y baja, influenciadas por la exposición climática. Las propiedades físicas permanecieron homogéneas a lo largo del

tiempo debido al movimiento del suelo por prácticas agrícolas como el desyerbe y la cosecha.

En cuanto a la infiltración, esta se puede considerar alta (27.48 cm/h), lo cual sumado con la baja capacidad de retención de humedad (menor al 6% para todas las zonas), inferior al promedio reportado para suelos agrícolas y no intervenidos de páramo, probablemente debido al impacto de las prácticas agrícolas, a la textura franca del suelo y moderado contenido de MO (18.59% en su valor más alto), el cual también es bajo si se compara con lo reportado para otros agroecosistemas de páramo. Generó que una parte considerable del agua de riego no se almacene en el suelo, sumado a los altos tiempo de riego y de la rápida infiltración se generen altas pérdidas de agua en forma de percolación o flujos subsuperficiales.

Objetivo específico 3:

A partir de la estimación de la ETo utilizando las variables medidas por la estación meteorológica en la zona de estudio, se concluyó que los meses más secos presentaron los valores de ETo más altos, por ejemplo, enero de 2024 con 114.2 mm/mes y una humedad relativa del 72.7%, mientras que los meses más húmedos mostraron los valores más bajos, como octubre de 2024 con 74.08 mm/mes y una humedad relativa del 91.9%. Aunque esta investigación se centró en estimar la ETo para un cultivo de referencia (un pasto verde de 12 cm), la revisión de la literatura sugiere que la ETo en esta zona es mayor que en otros ecosistemas de páramo. Esto implica que los cultivos en esta área pueden tener una mayor demanda hídrica en comparación con cultivos en otros ecosistemas de páramo.

Con base a la capacidad de retención de humedad del suelo, además de las entradas y salidas de agua del mismo se observó un porcentaje considerable de pérdidas de agua

(44% en promedio) en forma de percolación, flujos sub-superficiales o escorrentía, asociado a los altos tiempos de riego (136 minutos). De manera, que una alternativa para mejorar la gestión del agua de la zona corresponde a realizar riegos más frecuentes y de menor duración para evitar la sobresaturación del suelo, lo que podría llevar a la pérdida del agua por percolación, flujos subsuperficiales o escorrentía.

La evaluación de la eficiencia del sistema de riego reveló un rendimiento general deficiente, caracterizado por un CUC inferior al 70% y un CUD menor al 80%. Estos resultados indican que el sistema presenta una aplicación desigual del riego, lo que contribuye a pérdidas significativas y a un manejo ineficiente del recurso hídrico. Específicamente, la última evaluación mostró un aumento en las pérdidas de agua, alcanzando el 22%, lo que se relaciona con condiciones climáticas adversas, como altas velocidades de viento y temperaturas elevadas durante el riego. Por otro lado, las mediciones de presión y caudal del aspersor señalaron que el sistema no operó con los niveles óptimos, lo cual pudo afectar su eficiencia. Adicionalmente, los factores operativos del sistema, como la disposición manual y empírica de los aspersores, contribuyeron a una distribución ineficaz del riego. La falta de consideración de aspectos técnicos, como el radio de alcance de los aspersores, generó zonas con altas y bajas láminas de agua, reduciendo así la uniformidad del sistema.

La evaluación de la gestión del agua para riego en la sub-parcela de estudio por medio de los indicadores de gestión del agua para riego, evidenció una ineficiencia significativa en el uso del agua, por medio de los indicadores RIS, RWS y RRS, con valores de 2.9 ± 8.41 , 2.0 ± 1.75 y 0.6 ± 0.95 respectivamente. Los resultados semanales de los indicadores estuvieron por fuera de los valores recomendados, lo que indica que, si bien hay suficiente

disponibilidad hídrica en la zona, esta es usada ineficientemente.

La dependencia de la precipitación, especialmente durante los meses lluviosos permitió reducir el uso ineficiente de agua en forma de riego. Sin embargo, la aplicación excesiva de riego en los períodos de baja demanda o de sequías, generaron que los indicadores de gestión aumentaran sus valores, en especial el RIS y el RWS, los cuales se relacionan estrechamente con el riego. Esto resalta la necesidad de un enfoque más holístico en la toma de decisiones relacionadas con el riego, considerando no solo las precipitaciones, sino también la evapotranspiración y las características específicas del cultivo.

Propuestas de mejora de la gestión del agua para riego en ecosistema de páramo:

Las propuestas de mejora de la gestión del agua para riego de la unidad productiva de estudio, se centraron en la capacitación de los agricultores en la implementación de las BPA, ya que estas funcionan como un conjunto de herramientas que promueven una producción sostenible, reduciendo pérdidas de agua y mejorando la eficiencia en el uso de los recursos disponibles. Prácticas como la planificación del riego y el monitoreo continuo de las variables climáticas y del suelo han demostrado ser eficaces para incrementar la productividad y la sostenibilidad, alineándose con principios ambientales, sociales y económicos. Asimismo, la instalación de sistemas de monitoreo accesibles, como pluviómetros artesanales, tanques evaporímetros y tensiómetros, constituyen una alternativa práctica para cuantificar de manera estimativa las entradas, salidas y almacenamiento de agua en el suelo.

Además, la mejora de los sistemas de riego mediante la incorporación de temporizadores graduados y aspersores eficientes, sumado a la planificación de riegos en horarios estratégicos, como las primeras horas de la mañana o al atardecer, reduce

significativamente las pérdidas por evaporación y arrastre del viento, incrementando la uniformidad de aplicación. Por último, la propuesta de un calendario de riego, desarrollado a partir de un balance hídrico del suelo detallado y datos climáticos locales, constituye un modelo replicable práctico que facilita la toma de decisión de cuándo y cuánto regar. Estas propuestas no solo optimizan la eficiencia del riego, sino que también garantiza la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas agrícolas, promoviendo una producción resiliente frente a las variaciones climáticas y los desafíos asociados a la disponibilidad del recurso hídrico.

Referencias Bibliográficas

- Abd El-Wahed, M. H., Medici, M., & Lorenzini, G. (2016). Sprinkler irrigation uniformity: Impact on the crop yield and water use efficiency. *Journal of Engineering Thermophysics*, 25(1), 117-125. <https://doi.org/10.1134/S1810232816010112>
- Abdisamad, A. Q., & Sener, M. (2023). Benchmarking of Irrigation Performance in Karataş and Karaçal Irrigation Associations. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 20(1), 51-60. <https://doi.org/10.33462/jotaf.1065361>
- Agronet. (2022). *Reporte: Área, Producción, Rendimiento y Participación Municipal en el Departamento por Cultivo*. <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=4>
- Agronet, & Min agricultura. (2017). *Cebolla de Rama*. http://www.agronet.gov.co/Documents/15-CEBOLLA%20DE%20RAMA_2017.pdf
- Al Zayed, I., Elagib, N., Ribbe, L., & Heinrich, J. (2015). Spatio-temporal performance of large-scale Gezira Irrigation Scheme, Sudan. *Agricultural Systems*, 133, 131-142. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.10.009>
- Alemie, B. T., Defersha, D. T., Tesfaye, A. T., & Moges, M. M. (2023). Physical performance of small-scale irrigation scheme: a case study of Tilku Fetam irrigation scheme, Awi zone, Amhara region, Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, 9(1), 11. <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00789-9>
- Ali, M., & Mubarak, S. (2017). Effective Rainfall Calculation Methods for Field Crops: An Overview, Analysis and New Formulation. *Asian Research Journal of Agriculture*, 7(1), 1-12. <https://doi.org/10.9734/ARJA/2017/36812>
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (FAO). Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación.
- Allen, Richard., Smith, M., Pereira, L. S., Raes, D., & Wright, J. L. (2001). Revised FAO Procedures for Calculating Evapotranspiration: Irrigation and Drainage Paper No. 56 with Testing in Idaho. *Watershed Management and Operations Management 2000*, 1-10. [https://doi.org/10.1061/40499\(2000\)125](https://doi.org/10.1061/40499(2000)125)
- Alonso-Báez, M., López-Guillen, G., & Grajales-Solís, M. (2023). Mejoramiento de las propiedades hidráulicas del suelo en el cultivo de soya mediante el subsuelo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(5), 74-85. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i5.3102>
- Amorocho, A., Serrano, N., & Aceros, J. (2024). Cambios socioambientales en un ecosistema de páramo seco en el nororiente de Colombia. *Trabajo Social*, 26. <https://doi.org/10.15446/ts.v26n2.111916>
- Andrade, G., Chaves, M., Corzo, G., & Tapia, C. (2018). *Transiciones socioecológicas hacia la sostenibilidad. Gestión de la biodiversidad en los procesos de cambio en el territorio*

- continental colombiano* (Primera aproximación). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Andrade, H. J., Segura, M. A., & Canal-Daza, D. S. (2022). Conservation of Soil Organic Carbon in the National Park Santuario de Fauna y Flora Iguaque, Boyacá-Colombia. *Forests*, 13(8), 1275. <https://doi.org/10.3390/f13081275>
- Andrade, Pacheco, J. C. C., Costa, G. L. L., Alencar, C. A. B. de, & Cunha, F. F. da. (2022). Uniformity of water distribution by a sprinkler irrigation system on a soccer field. *Bioscience Journal*, 38, e38012. <https://doi.org/10.14393/BJ-v38n0a2022-57028>
- Andrade, Zanini, J. R., & Soares, C. A. (2015). Hydraulic performance of new and used self-compensating micro-sprinklers. *Semina: Ciências Agrárias*, 36(6), 3517. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2015v36n6p3517>
- Andrés, R., & Cuchí, J. A. (2014). Analysis of sprinkler irrigation management in the LASESA district, Monegros (Spain). *Agricultural Water Management*, 131, 95-107. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.09.016>
- ANO, A. O., & Ubochi, C. I. (2007). Neutralization of soil acidity by animal manures: mechanism of reaction. *African Journal of Biotechnology*, 6, 364-368.
- Aparecido, L. M. T., Teodoro, G. S., Mosquera, G., Brum, M., Barros, F. de V., Pompeu, P. V., Rodas, M., Lazo, P., Müller, C. S., Mulligan, M., Asbjornsen, H., Moore, G. W., & Oliveira, R. S. (2018). Ecohydrological drivers of Neotropical vegetation in montane ecosystems. *Ecohydrology*, 11(3). <https://doi.org/10.1002/eco.1932>
- ASTM. (2001). ASTM D4972-18: Standard test method for pH of soils. *In Annual Book of ASTM Standards*, 1-7.
- ASTM. (2005). ASTM D2216-10; Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. *In Annual Book of ASTM Standards*, 1-7.
- ASTM. (2009). ASTM D7263-21; Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density and Unit Weight of Soil Specimens. *In Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM. (2011). ASTM F1647-11; Standard Test Methods for Organic Matter Content of Athletic Field Rootzone Mixes. *In Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM. (2014). ASTM D854-14; Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. *In Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM. (2018a). ASTM D3385-18: Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer. *American Society for Testing and Materials*.
- ASTM. (2018b). ASTM F1815; Standard Test Methods for Saturated Hydraulic Conductivity, Water Retention, Porosity, and Bulk Density of Athletic Field Rootzone. *In Annual Book of ASTM Standards*.
- Avellaneda, L. M., León Sicard, T. E., & Torres, E. (2018). Impact of potato cultivation and cattle farming on physicochemical parameters and enzymatic activities of Neotropical

- high Andean Páramo ecosystem soils. *Science of The Total Environment*, 631-632, 1600-1610. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.137>
- Avellaneda, L. M., Núñez, A. P. P., Pérez, L. D. J., & Buitrago, B. A. (2022). Heavy metals and pesticides in soils under different land-use patterns in neotropical high Andean Páramos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 46. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcS20210135>
- Ayele, W. T., Ayele, Z. T., Shumey, E. E., & Demessie, S. A. (2021). Performance evaluation of Lower Fetam and Leza small-scale irrigation schemes by using internal and external process indicators: case study in west gojjam zone, Amhara, Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, 7(5), 70. <https://doi.org/10.1007/s40899-021-00554-4>
- Barrera, J., & Bautista, E. (2022). *Influencia de las actividades agropecuarias sobre el contenido de nitrógeno en el agua superficial de una unidad hidrográfica en el páramo de Berlín (Santander, Colombia)* [Tesis pregrado]. Universidad Industrial de Santander.
- Bejar, S. J., Cantú Silva, I., Yáñez Díaz, M. I., & Luna Robles, E. O. (2020). Curvas de retención de humedad y modelos de pedotransferencia en un Andosol bajo distintos usos de suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(59). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.666>
- Benavides, I. F., Solarte, M. E., Pabón, V., Ordoñez, A., Beltrán, E., Rosero, S., & Torres, C. (2018). The variation of infiltration rates and physical-chemical soil properties across a land cover and land use gradient in a Paramo of southwestern Colombia. *Journal of Soil and Water Conservation*, 73(4), 400-410. <https://doi.org/10.2489/jswc.73.4.400>
- Benavides, J., Hernández, E., Mateos, L., & Fereres, E. (2021). A global analysis of irrigation scheme water supplies in relation to requirements. *Agricultural Water Management*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106457>
- Benavides, J., Mateos, L., García-Vila, M., & Fereres, E. (2021). Evaluating irrigation scheme performance in a tropical environment: The Guanacaste scheme, Costa Rica*. *Irrigation and Drainage*, 70(5), 1331-1346. <https://doi.org/10.1002/ird.2621>
- Berrones, G., Crespo, P., Wilcox, B. P., Tobón, C., & Célleri, R. (2021). Assessment of fog gauges and their effectiveness in quantifying fog in the Andean páramo. *Ecohydrology*, 14(6). <https://doi.org/10.1002/eco.2300>
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1-2), 53-72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Buytaert, W., Iñiguez, V., & Bièvre, B. De. (2007). The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. *Forest Ecology and Management*, 251(1-2), 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.035>
- Canales, F., Zubezu, S., & Rodríguez-Sinobas, L. (2019). Irrigation systems in smart cities coping with water scarcity: The case of Valdebebas, Madrid (Spain). *Journal of Environmental Management*, 247, 187-195. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.062>

- Cárdenas, M. F., Tobón, C., & Buytaert, W. (2017). Contribution of occult precipitation to the water balance of páramo ecosystems in the Colombian Andes. *Hydrological Processes*, 31(24), 4440-4449. <https://doi.org/10.1002/hyp.11374>
- Carvalho, O. S., Saa, A., Montes, J. M. G., Caballero, R., & López, F. G. (1999). Variabilidad temporal de algunas propiedades químicas en un suelo sometido a distintas sucesiones de cultivo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 34(12), 2299-2309. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999001200017>
- Castiglione, M., Kreamer, F., & Marquez, J. (2018). CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA DETERMINADA POR DISTINTOS PROCEDIMIENTOS EN SUELOS CON ALTA HUMEDAD INICIAL. *Asociación Argentina ciencia del suelo*, 36(2), 158-169.
- Cavero, J., Faci, J. M., & Martínez-Cob, A. (2016). Relevance of sprinkler irrigation time of the day on alfalfa forage production. *Agricultural Water Management*, 178, 304-313. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.008>
- CDMB. (2020). Diseño e implementación de un esquema de pago por servicios ambientales hídricos en el páramo de Berlín. En *Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga*. <http://hdl.handle.net/20.500.11761/35557>
- Celis, A. (2022). *Evaluación de los efectos del cambio de uso de suelo y cobertura sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica ofertados por unidades hidrográficas de páramo* [Tesis posgrado]. Universidad Industrial de Santander.
- Chaparro, D., & Peñalosa, M. (2012). Un Camino al Desarrollo Territorial: la especialización en la producción de Cebolla de Rama “*Allium Fistulosum*” en el municipio de Aquitania - Boyacá. *Cuadernos Latinoamericanos de Administración*, 8, 69-81.
- Christiansen, J. E. (1942). *Irrigation by sprinkling (Bulletin 670)*. University of California college of agriculture.
- Clark, K., Torres, M. A., West, A. J., Hilton, R. G., New, M., Horwath, A. B., Fisher, J. B., Rapp, J. M., Robles Caceres, A., & Malhi, Y. (2014). The hydrological regime of a forested tropical Andean catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(12), 5377-5397. <https://doi.org/10.5194/hess-18-5377-2014>
- Clavitea, A., Mamani, J. A., Huaquisto, E., Alfaro-Alejo, R., & Belizario, G. (2023). Uniformity of water distribution in sprinkler irrigation mini-cannons in a high Andean community in Peru. *E3S Web of Conferences*, 434, 03028. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343403028>
- Cresswell, H., Smiles, D., & Williams, J. (1992). Soil structure, soil hydraulic properties and the soil water balance. *Soil Research*, 30(3). <https://doi.org/10.1071/SR9920265>
- Criddle, W. D. (1956). *Methods for evaluating irrigation systems*. *Agriculture Handbook*.
- Cuatrecasas, J. (1958). Aspectos de la vegetación natural de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas*, 10(40), 221-264.

- DANE. (2013). Encuesta nacional de calidad de vida (ECV).
- Daza, M., Hernández, F., & Alba, T. (2009). Efecto de actividades agropecuarias en la capacidad de infiltración de los suelos de páramo del Sumapaz. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 8.
- Daza, M., Hernández, F., & Triana, F. (2014). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 67(1), 7189-7200. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42642>
- Díaz, E., Duarte, O., Cerana, J., & Fontanini, P. (2003). AJUSTE METODOLÓGICO EN LA MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA “IN SITU” EN SUELOS VERTISOLES Y ENTISOLES DE LA REPÚBLICA ARGENTINA MEDIANTE EL PERMEÁMETRO DE GUELPH. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, 6.
- Díaz, J., Varela, D., Ordoñez, W., Solanilla, M., & Bahamón, Á. (2020). Agricultura en páramos: entre la conservación y los derechos de las comunidades. *Fondo nacional ambiental*.
- Díaz, M., Navarrete, J. D., & Suárez, T. (2005). Páramos: Hidrosistemas Sensibles. *Revista de ingeniería*, 66.
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. (1977). Crop water requirements. En *Estudio FAO: Riego y Drenaje*, No. 24. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Duarte, A. C., & Mateos, L. (2022). How changes in cropping intensity affect water usage in an irrigated Mediterranean catchment. *Agricultural Water Management*, 260, 107274. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107274>
- Espinosa, J., & Rivera, D. (2016). Variations in water resources availability at the Ecuadorian páramo due to land-use changes. *Environmental Earth Sciences*, 75(16), 1173. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5962-1>
- FAO. (2012). *AQUASTAT Database, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*. www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang5en;
- FAO. (2016). *A Scheme and Training Manual on Good Agriculture Practices For Fruits and Vegetables* (Vol. 1). <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/8116d523-97a5-46b7-8e2f-2eea68d4035f/content>
- FAO. (2020). *World Food and Agriculture - Statistical Yearbook 2020*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb1329en>
- Farfán, M. A., Forero, S. M., & Avellaneda-Torres, L. M. (2020). Evaluation of impacts of potato crops and livestock farming in Neotropical high Andean Páramo soils, Colombia. *Acta Agronómica*, 69(2), 106-116. <https://doi.org/10.15446/acag.v69n2.82206>

- Faryabi, A., Maroufpoor, E., Ghamarnia, H., & Yamin Moshrefi, G. (2020). Comparison of classical sprinkler and wheel move irrigation systems in dehgolan plain, north-west Iran. *Irrigation and Drainage*, 69(3), 352-362. <https://doi.org/10.1002/ird.2412>
- Fernández, C., Cely, G., & Ramírez, P. (2019). Cuantificación de la captura de carbono y análisis de las propiedades del suelo en coberturas naturales y una plantación de pino en el páramo de Rabanal, Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28(1), 121-133. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.66152>
- Flórez, N., Zution, I., Rogrigues, D., Agnellos, E. A., Ponciano, F., Diego, M., & Eiji, E. (2013). Eficiencia de aplicación de agua en la superficie y en el perfil del suelo de un sistema de riego por aspersión. *Agrociencia*, 47(2), 107-109.
- Frost, K., & Schwalen, H. (1955). Sprinkler evaporation losses. *Agricultural Engineering*, 36(8), 526-528.
- Garavito, L. (2015). Los páramos en Colombia, un ecosistema en riesgo. *Ingeniare*, 19, 127-136. <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.19.530>
- García, J. (2007). Las curvas de retención de humedad y su estimación mediante funciones de pedotransfer en suelo agrícolas de Artemisa y Mayabeque. *Universidad Agraria de La Habana*.
- Gómez, Arrubla, J., Paredes, D., & Guerrero, G. (2022). Agricultural practices in onion crops and their impact on water quality in Risaralda, Colombia. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 20(4), 615-634. <https://doi.org/10.1080/14735903.2021.1963604>
- Gómez, R. (2010). Módulo 3: Riego por aspersión. En *Manual de riego para agricultores*: Consejería de Agricultura y Pesca.
- Gómez, V. (2022). *Evaluación del comportamiento de la evapotranspiración en una unidad hidrográfica no intervenida de ecosistema de páramo* [Tesis posgrado]. Universidad Industrial de Santander.
- Grajales, L. (2017). *Uso racional del agua de riego en cultivos de aguacate HASS (Persea americana) en tres zonas productoras de Colombia* [Tesis posgrado]. Universidad Nacional de Colombia.
- Guo, L., Fan, B., Zhang, J., & Lin, H. (2018). Occurrence of subsurface lateral flow in the Shale Hills Catchment indicated by a soil water mass balance method. *European Journal of Soil Science*, 69(5), 771-786. <https://doi.org/10.1111/ejss.12701>
- Gutiérrez, P., & Medrano-, P. (2019). The effects of climate change on decomposition processes in Andean Paramo ecosystem-synthesis, a systematic review. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(2), 1-2. https://doi.org/10.15666/aer/1702_49574970
- Gutiérrez-Malaxechebarría, A.-M. (2013). Informal Irrigation in the Colombian Andes: Local Practices, National Agendas, and Options for Innovation. *Mountain Research and Development*, 33(3), 260-268. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-12-00116.1>

- Guzmán, P., Batelaan, O., Huysmans, M., & Wyseure, G. (2015). Comparative analysis of baseflow characteristics of two Andean catchments, Ecuador. *Hydrological Processes*, 29(14), 3051-3064. <https://doi.org/10.1002/hyp.10422>
- Haj-Amor, Z., Ritzema, H., Hashemi, H., & Bouri, S. (2018). Surface irrigation performance of date palms under water scarcity in arid irrigated lands. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(2), 27. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3374-5>
- Hakuzimana, J., & Masasi, B. (2020). Performance evaluation of irrigation schemes in rugeramigozi marshland, rwanda. *Water Conservation and Management*, 4(1), 15-19. <https://doi.org/10.26480/wcm.01.2020.15.19>
- Hamid Ahmadi, S., Solgi, S., & Mashouqi, S. (2024). Sprinkler Irrigation System Performance in Winter Wheat Fields: A Comprehensive Study. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 150(2). <https://doi.org/10.1061/JIJDH.IRENG-10210>
- Hasan, I. F., & Abdullah, R. (2022). Agricultural Drought Characteristics Analysis Using Copula. *Water Resources Management*, 36(15), 5915-5930. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03331-w>
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations*. Elsevier.
- Hofstede, R., Calles, J., Lopéz, V., Polanco, R., Torres, F., & Ulloa, J. (2014). *Los Páramos Andinos ¿Qué Sabemos?: Estado del conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema de páramo*. (1.ª ed.). UICN.
- Holzman, M., Rivas, R., Carmona, F., & Niclòs, R. (2017). A method for soil moisture probes calibration and validation of satellite estimates. *MethodsX*, 4, 243-249. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2017.07.004>
- Huertas, B., Martínez, E., Clímaco, J., Galindo, R., Pérez, M., Vargas, R., & Polo, S. (2020). *Cebolla de rama (Allium fi stulosum L.) Manual de recomendaciones técnicas para su cultivo en el departamento de Cundinamarca*. Corredor Tecnológico Agroindustrial CTA-2. http://investigacion.bogota.unal.edu.co/fileadmin/recursos/direcciones/investigacion_bogota/Manuales/05-manual-cebolla-rama-2020-EBOOK.pdf
- Huffman, R., Fangmeier, D., Elliot, W., & Workman, S. (2013). *Soil and Water Conservation and the Environment* (7th edition). American Society of Agricultural and Biological Engineers. <https://doi.org/10.13031/swce.2013.1>
- ICA. (1992). Fertilización en diversos cultivos. 5a. aproximación. Manual de asistencia técnica No. 25. INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO.
- IDEAM. (2018). *Promedios climatológicos 1981-2010*. <https://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima>
- IDEAM. (2023). *Estudio Nacional del Agua 2022*. Ideam.
- IDEAM. (2024). *Geoportal Ambiental Institucional - IDEAM*. <https://experience.arcgis.com/experience/568ddab184334f6b81a04d2fe9aac262/page/>

Geoportal-Institucional/

IGAC. (2006). *Métodos analíticos de laboratorio de suelos* (6.^a ed.).

IGAC. (2018). *Mapas de Suelos del Territorio Colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Santander.*

INIA. (2017). *Manual de producción de Cebolla.*

Iñiguez, V., Morales, O., Cisneros, F., Bauwens, W., & Wyseure, G. (2016). Analysis of the drought recovery of Andosols on southern Ecuadorian Andean páramos. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(6), 2421-2435. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2421-2016>

ISO. (1994). ISO 11265: Soil Quality, Determination of the Specific Electrical Conductivity. *International Organization for Standardization.*

Ivanova, Y., & Marín-Arévalo, L. C. (2020). Estudio de afectación del servicio ecosistémico de regulación hídrica por actividades de agricultura en la cuenca del río Gachaneca I, páramo Rabanal. *Gestión y Ambiente*, 23(2), 193-202. <https://doi.org/10.15446/ga.v23n2.88051>

Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del Suelo*. Universidad Nacional de Colombia

Kayat, F., Mohammed, A., & Ibrahim, A. M. (2021). Spring Onion (*Allium fistulosum* L.) Breeding Strategies. En *Advances in Plant Breeding Strategies: Vegetable Crops* (pp. 135-182). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66969-0_4

Kibret, E., Abera, A., Ayele, W. T., & Alemie, N. A. (2021). Performance Evaluation of Surface Irrigation System in the Case of Dirma Small-Scale Irrigation Scheme at Kalu Woreda, Northern Ethiopia. *Water Conservation Science and Engineering*, 6(4), 263-274. <https://doi.org/10.1007/s41101-021-00119-8>

Klute, A. (1982). *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods* (2nd ed., Vol. 1). Wiley.

Leroy, D. (2019). Farmers' Perceptions of and Adaptations to Water Scarcity in Colombian and Venezuelan Páramos in the Context of Climate Change. *Mountain Research and Development*, 39(2). <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-18-00062.1>

Leroy, D., & Barrasa, S. (2021). Which Ecosystem Services Are Really Integrated into Local Culture? Farmers' Perceptions of the Colombian and Venezuelan Páramos. *Human Ecology*, 49(4), 385-401. <https://doi.org/10.1007/s10745-021-00251-y>

Levine, G. (1982). *Relative water supply: An explanatory variable for irrigation systems. Technical Report No. 6; The Determinants of Irrigation Project Problems in Developing Countries*. NY: Cornell University.

Llambí, L., Sarmiento, L., & Rada, F. (2013). Evolución de la investigación ecológica en los páramos de Venezuela: múltiples visiones de un ecosistema único. *Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas*, 173-209.

- Llambí, Luis., Becerra, M., Peralvo, M., Avella, A., Baruffol, M., & Díaz, L. J. (2020). Monitoring Biodiversity and Ecosystem Services in Colombia's High Andean Ecosystems: Toward an Integrated Strategy. *Mountain Research and Development*, 39(3). <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-19-00020.1>
- López, M., Mujica, A., & Duarte, L. (2011). Criterio sobre la formulación matemática para el cálculo de las pérdidas por evaporación y arrastre en emisores de baja presión. *Ciencias técnicas agropecuarias*, 20, 65-69.
- Luethje, M., Benito, X., Schneider, T., Mosquera, P. V., Baker, P., & Fritz, S. C. (2023). Paleolimnological responses of Ecuadorian páramo lakes to local and regional stressors over the last two millennia. *Journal of Paleolimnology*, 69(4), 305-323. <https://doi.org/10.1007/s10933-022-00274-5>
- Macias, Y., & Omaña, H. (2018). *Validación de la metodología Corine Land Cover para generación de mapa de cobertura del suelo: caso cuenca del río Jordan (Tona, Santander)* [Tesis Pregrado]. Universidad Industrial de Santander.
- Maroufpoor, S., Maroufpoor, E., & Khaledi, M. (2019). Effect of farmers' management on movable sprinkler solid-set systems. *Agricultural Water Management*, 223, 105691. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105691>
- MinAgricultura. (2017). *Cebolla de rama*. In *Evaluaciones Agropecuarias Municipales* (p. 4). Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. https://www.agronet.gov.co/Documents/15-CEBOLLA DE RAMA_2017.pdf
- Molden, S., Perry, C., de Fraiture, C., & Kloezen, W. H. (1998). Indicators for Comparing Performance of Irrigated Agricultural Systems. *International Water Management Institute*, . <https://doi.org/10.1080/09500690500153808>
- Molina, R. A., Campos, R., Sánchez, H., Giraldo, L., & Atzori, A. (2019). Sustainable Feedbacks of Colombian Paramos Involving Livestock, Agricultural Activities, and Sustainable Development Goals of the Agenda 2030. *Systems*, 7(4), 52. <https://doi.org/10.3390/systems7040052>
- Moreno, M. F., & Roldán, J. (2013). Assessment of irrigation water management in the Genil-Cabra (Córdoba, Spain) irrigation district using irrigation indicators. *Agricultural Water Management*, 120, 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.06.020>
- Mosquera, Hofstede, Bremer, L., Asbjornsen, H., Carabajo-Hidalgo, A., Céleri, R., Crespo, P., Esquivel-Hernández, G., Feyen, J., Manosalvas, R., Marín, F., Mena-Vásconez, P., Montenegro-Díaz, P., Ochoa-Sánchez, A., Pesántez, J., Riveros-Iregui, D. A., & Suárez, E. (2023). Frontiers in páramo water resources research: A multidisciplinary assessment. *Science of The Total Environment*, 892, 164373. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164373>
- Mosquera, Marín, F., Stern, M., Bonnesoeur, V., Ochoa-Tocachi, B., Román-Dañobeytia, F., & Crespo, P. (2022). Progress in understanding the hydrology of high-elevation Andean grasslands under changing land use. *Science of The Total Environment*, 804, 150112. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150112>

- Mosquera, V. H., Delgado, J. A., Alwang, J. R., López, L. O. E., Ayala, Y. E. C., Andrade, J. M. D., & D'Adamo, R. (2019). Conservation Agriculture Increases Yields and Economic Returns of Potato, Forage, and Grain Systems of the Andes. *Agronomy Journal*, *111*(6), 2747-2753. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.04.0280>
- Moursy, M., & Wasfy, K. I. (2022). Impact of climatic conditions on irrigation water requirements and hydraulic characteristics of modern irrigation systems. *Environment, Development and Sustainability*, *24*(10), 12079-12096. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01934-8>
- Naciones Unidas. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*.
- Neira, E., Ramos, L., & Razuri, L. R. (2020). Coeficiente del cultivo (Kc) del arroz a partir de lisímetro de drenaje en La Molina, Lima-Perú. *Idesia (Arica)*, *38*(2), 49-55. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292020000200049>
- NTC. (2018). *Norma Técnica Colombiana, Calidad del suelo. Determinación de la textura por Bouyoucos* (pp. 1-11). <https://tienda.icontec.org/gp-calidad-del-suelo-determinacion-de-la-textura-por-bouyoucos-ntc6299-2018.html>
- Ochoa-Sánchez, A. E., Crespo, P., Carrillo-Rojas, G., Marín, F., & Célleri, R. (2020). Unravelling evapotranspiration controls and components in tropical Andean tussock grasslands. *Hydrological Processes*, *34*(9), 2117-2127. <https://doi.org/10.1002/hyp.13716>
- OMM-N-168. (2011). *Guía de prácticas hidrológicas: Vol. Volumen I* (Sexta Edición). https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10038
- ONU. (2022). *La población mundial llegará a 8.000 millones el 15 de noviembre de 2022*.
- Padula, G., Xia, X., & Hołubowicz, R. (2022). Welsh Onion (*Allium fistulosum* L.) Seed Physiology, Breeding, Production and Trade. *Plants*, *11*(3), 343. <https://doi.org/10.3390/plants11030343>
- Palacios, C., Díaz, T., Munguía, J. P., Partida, L., Velásquez, T. de J., & López, B. E. (2017). Relación entre indicadores de desempeño y la calidad del riego utilizando pivote central. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *8*(1), 39-51. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i1.70>
- Patiño, S. (2021). *Evaluación del efecto del uso del suelo sobre sus propiedades hidrofísicas en ecosistema de páramo asociadas a los servicios de suministro y regulación hídrica* [Tesis de posgrado]. Universidad Industrial de Santander.
- Patiño, S., Hernández, Y., Plata, C., Domínguez, I., Daza, M., Oviedo-Ocaña, R., Buytaert, W., & Ochoa-Tocachi, B. F. (2021). Influence of land use on hydro-physical soil properties of Andean páramos and its effect on streamflow buffering. *CATENA*, *202*, 2-3. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105227>
- Patiño-Gutiérrez, S. E., Domínguez-Rivera, I. C., Daza-Torrez, M. C., Ochoa-Tocachi, B. F., & Oviedo-Ocaña, E. R. (2024). Effects of rainfall seasonality and land use change on

- soil hydrophysical properties of high-Andean dry páramo grasslands. *CATENA*, 238, 107866. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107866>
- Pereira, L., Allen, R. G., Smith, M., & Raes, D. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management*, 147, 4-20. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>
- Perry, C. (1996). Quantification and measurement of a minimum set of indicators of the performance of irrigation systems. *International Irrigation Management Institute*.
- Pinzón, H. (2004). *La cebolla de rama (Allium fistulosum) y su cultivo* (L. Fierro, Ed.). Corpoica.
- Ponce, J. (2024). *Caracterización de los perfiles de meteorización del Monzogranito de Santa Bárbara y depósito asociado en el Páramo de Berlín, Santander*. [Tesis pregrado]. Universidad Industrial de Santander.
- Porta, J., López, M., & Poch, R. (2010). *Introducción a la Edafología: Uso y protección de los suelos*. Mundi-Prensa.
- Python. (s. f.). *Python Software Foundation*. Recuperado 14 de febrero de 2024, de <https://www.python.org/>
- Ray, R. W., & Nyle, C. B. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (15.^a ed.).
- Rayne, N., & Aula, L. (2020). Livestock Manure and the Impacts on Soil Health: A Review. *Soil Systems*, 4(4), 64. <https://doi.org/10.3390/soilsystems4040064>
- Restrepo, J., Ardila, E., & Gualdrón, J. (2008). *Plan Integral de Manejo del Distrito de Manejo Integrado de los Recursos Naturales «Páramo de Berlín»*.
- Rey-Romero, D. C., Domínguez, I., & Oviedo-Ocaña, E. R. (2022). Effect of agricultural activities on surface water quality from páramo ecosystems. *Environmental Science and Pollution Research*, 5-17. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21709-6>
- Rodríguez-Robayo, Pulido-Blanco, V. C., Martínez-Camelo, F. E., & Meneses-Buitrago, D. H. (2024). RESTRUCTURING THE AGRICULTURAL PRODUCTION IN THE TOTA LAKE BASIN (COLOMBIA): PROS AND CONS TO ACHIEVE THE CHANGE. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 27(2). <https://doi.org/10.56369/tsaes.5201>
- Rodríguez-Robayo, Pulido-Blanco, V., Rojas, D., & Martínez, F. (2022). Buenas prácticas agrícolas y sostenibilidad del cultivo de cebolla de rama (*Allium fistulosum* L.) en la cuenca del lago de Tota (Boyacá, Colombia). *Agroalimentaria*, 28(54), 139-169. <https://doi.org/10.53766/Agroalim/2022.28.54.09>
- Roldán, J., Díaz, M., & Moreno, M. F. (2011). Irrigation performance indicators for best irrigation management in an irrigation district. *Acta Horticulturae*, 889, 521-528. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.889.66>
- Roldán, J., Díaz, M., Pérez, R., & Moreno, M. (2010). Mejora de la gestión del agua de riego mediante el uso de indicadores de riego. *Revista de la facultad de Ciencias Agrarias*, 42(1), 107-124.

- Ruiz, O., Martínez, I., & Figueroa, J. (2015). Agricultura sostenible en ecosistemas de alta montaña. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 13, 129-138.
- Sánchez, G., Pinzón, H., Clímaco, J., Herrera, C., Martínez, E., Quevedo, D., Murcia, G., Pedraza, R., Martínez, P., Ortiz, L., Montaña, C., Valderrama, Y., Pinzón, L., & Rodríguez, J. (2012). *Manual de la cebolla de rama*. Corpoica .
- Sánchez, I., Ochoa, D., & Ortiz, J. (2021). *De la producción más limpia al manejo ecológico de cebolla de rama (Allium fistulosum) : en el Cañón del Chinche, Valle Del Cauca* (Editorial Universidad Nacional de Colombia, Ed.; 1.^a ed., Vol. 1). Universidad Nacional de Colombia.
- Sapir, E., & Sne, M. (2004). *Sprinkler Irrigation*.
- Sarmiento, C., Osejo, A., Ungar, P., & Zapata, J. (2017). Páramos habitados: desafíos para la gobernanza ambiental de la alta montaña en Colombia. *Biodiversidad en la práctica*, 2(1), 122-145.
- Shongwe, M. I., & Tsabedze, N. (2021). Evaluation of irrigation adequacy in sugarcane systems in Eswatini. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 21(02), 17464-17476. <https://doi.org/10.18697/ajfand.97.19115>
- Singh, B. (2018). Welsh Onion (*Allium fistulosum* L.): A Promising Spicing-Culinary Herb of Mizoram. *Indian Journal of Hill Farming*, 30(2), 201-208.
- Sklenář, P., Kučerová, A., Macková, J., & Macek, P. (2015). Temporal variation of climate in the high-elevation páramo of Antisana, Ecuador. *Geogr. Fis. Din. Quat*, 38, 67-78.
- Smith, R., Cahn, M., Cantwell, M., Koike, S., Natwick, E., & Takele, E. (2011). *Green Onion Production in California*. University of California, Agriculture and Natural Resources. <https://doi.org/10.3733/ucanr.7243>
- Soil Survey Staff. (2022). *Keys to Soil Taxonomy* (United States Department of Agriculture & Natural Resources Conservation Service, Eds.; 13th ed.).
- Thompson, J. B., Zurita-Arthos, L., Müller, F., Chimbolema, S., & Suárez, E. (2021). Land use change in the Ecuadorian páramo: The impact of expanding agriculture on soil carbon storage. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 53(1), 48-59. <https://doi.org/10.1080/15230430.2021.1873055>
- UNE. (2017). *Equipos para riego. Aspersores. Requisitos generales y métodos de ensayo*.
- Unger, P. W. (2006). *Soil and water conservation handbook: Policies, practices, conditions, and terms*. Haworth Food & Agricultural Products Press.
- USDA. (2017). *Soil Survey Manual* . United States Department Of Agriculture.
- Vásquez. (2014). Las dinámicas de las actividades de producción y consumo en el sector rural: reflexiones a partir del caso del centro poblado (cp) del corregimiento de Berlín, Santander. *Revista M*, 11(2), 46. <https://doi.org/10.15332/rev.m.v11i2.1724>

- Vásquez, A., & Buitrago, A. C. (2011). *El gran libro de los Páramos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Vásquez, Balslev, H., & Sklenář, P. (2015). Human impact on tropical-alpine plant diversity in the northern Andes. *Biodiversity and Conservation*, 24(11), 2673-2683. <https://doi.org/10.1007/s10531-015-0954-0>
- Vásquez, Célleri, R., Córdova, M., & Carrillo-Rojas, G. (2022). Improving reference evapotranspiration (ET_o) calculation under limited data conditions in the high Tropical Andes. *Agricultural Water Management*, 262, 107439. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107439>
- Vásquez, K. B. (2014). Las dinámicas de las actividades de producción y consumo en el sector rural: reflexiones a partir del caso del centro poblado (cp) del corregimiento de Berlín, Santander. *Revista M*, 11(2), 46. <https://doi.org/10.15332/rev.m.v11i2.1724>
- Vásquez, Vásquez, I., Vásquez, C., & Cañamero, M. (2017). *Fundamentos de la ingeniería de riego* (1.^a ed.). Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Walteros, I., Palacios, S., Cely, G. E., Serrano, P. A., & Moreno, D. (2022). Influencia del cambio de uso del suelo sobre las reservas de carbono orgánico en el Parque Natural Regional Cortadera, Boyacá (Colombia). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 25(2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1846>
- Yari, A., Madramootoo, C., Woods, S., & Adamchuk, V. (2017). Performance Evaluation of Constant Versus Variable Rate Irrigation. *Irrigation and Drainage*, 66(4), 501-509. <https://doi.org/10.1002/ird.2131>