

Diseño agronómico e hidráulico de un sistema de riego por aspersión para el cultivo de
cebolla de rama en el páramo de Berlín

Julián Andrés Díaz Duarte

Leidy Katherine Quiroga González

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Phd. En Ingeniería, énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Codirector

John Jairo Marquez Molina

Phd. En Ciencias Agropecuarias

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A Dios, por acompañarme en cada paso del camino, por darme fuerza en los momentos más difíciles y por permitirme llegar hasta aquí, cumpliendo este gran sueño.

A mis padres, Tilcia Duarte Ureña y Elio Díaz González, por su amor incondicional, su confianza y su apoyo constante a lo largo de esta etapa. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo, la perseverancia y la disciplina; por nunca darse por vencidos, por luchar a mi lado y por creer en este sueño tanto como yo. Cada sacrificio que hicieron por mí hoy se refleja en este logro, que también les pertenece. Me siento profundamente orgulloso de ser su hijo, y este triunfo lleva sus nombres tanto como el mío, porque sin ustedes nada de esto habría sido posible.

Julián Andrés Díaz Duarte

Dedico este logro, en primer lugar, a Dios, por ser mi guía constante, darme fortaleza en los momentos de dificultad y permitirme alcanzar una de las metas de mi vida.

A mi mamá, Virgelina González Lozano, por su amor incondicional, su apoyo permanente y por ser el pilar fundamental de mi vida. Gracias por creer siempre en mí, por cada sacrificio y por impulsarme a seguir adelante con dedicación y esperanza.

A mi papá, Absalón Quiroga Romero, por sus consejos, su apoyo incondicional y por enseñarme, con su ejemplo, el valor de la disciplina, la responsabilidad y la perseverancia para alcanzar cada una de mis metas.

Este logro también es de ustedes. Gracias por su esfuerzo, confianza y amor incondicional, porque sin su apoyo nada de esto habría sido posible. Cada paso dado hasta aquí lleva el reflejo de todo lo que han hecho por mí.

Leidy Katherine Quiroga González

Agradecimientos

Expresamos nuestro sincero agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander por brindarnos una formación académica de calidad, que nos permitió adquirir los conocimientos y competencias necesarias para el desarrollo de este trabajo de investigación y para nuestra formación como ingenieros civiles.

Agradecemos de manera especial a nuestro director, Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, y a nuestro codirector, John Jairo Márquez Molina, por su orientación, acompañamiento, disposición y valiosos aportes durante el desarrollo de este proyecto. Su experiencia y apoyo fueron fundamentales para alcanzar los objetivos propuestos.

Expresamos también nuestro agradecimiento al profesor Heller, por permitir que esta investigación se desarrollara en los predios de su propiedad y por la colaboración brindada durante el trabajo de campo.

Extendemos nuestro reconocimiento a los docentes de la Escuela de Ingeniería Civil, quienes, con sus enseñanzas y experiencia, contribuyeron de manera significativa a nuestra formación académica y profesional.

A nuestras familias, les expresamos nuestra más profunda gratitud por su amor, apoyo incondicional, comprensión y constante motivación durante este proceso. Su confianza y respaldo fueron un pilar fundamental para alcanzar esta meta.

Finalmente, agradecemos al Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) por el apoyo, la orientación y el acompañamiento brindados durante la ejecución del proyecto, así como a todas las personas que, de una u otra forma, aportaron al desarrollo y culminación de este trabajo.

Julián Andrés Díaz Duarte, Leidy Katherine Quiroga González

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Estado del arte.....	13
2. Planteamiento del problema.....	14
3. Justificación	16
4. Objetivos	17
4.1. Objetivo general.....	17
4.2. Objetivos específicos	17
5. Marco teórico	17
5.1. Marco referencial	17
5.1.1. Ecosistemas de páramo	17
5.1.2. Condiciones climáticas del páramo	18
5.1.3. Cebolla de rama (allim fistulosum l.)	18
5.1.4. Relación agua – suelo - planta	19
5.1.5. Riego por aspersión.....	20
5.1.6. Diseño agronómico de riego por aspersión.....	20
5.1.7. Diseño hidráulico de riego por aspersión.....	21
6. Metodología	22
6.1.1. Zona de estudio	23
6.2. Fase i: reconocimiento del área de estudio y diseño agronómico	24
6.2.1. Actividades previas	24
6.2.2. Selección subparcelas	25
6.2.3. Análisis de datos climáticos	25
6.2.4. Evapotranspiración	26
6.2.5. Diseño agronómico del sistema de riego	26
6.3. Fase ii: diseño hidráulico del sistema de riego por aspersión	27
6.3.1. Actividades previas	27
6.3.2. Diseño hidráulico del sistema de riego	27
6.4. Fase iii: evaluación económica y viabilidad del sistema de riego	29
7. Análisis y discusión de resultados	30
7.1. Caracterización edáfica de la subparcela de estudio	30
7.1.1. Textura y densidad aparente del suelo	30
7.1.2. Capacidad de campo y punto de marchitez permanente	31

7.1.3.	Infiltración básica del suelo	31
7.2.	Evapotranspiración de referencia y del cultivo	32
7.2.1.	Evapotranspiración de referencia (eto)	32
7.2.2.	Coeficiente de cultivo y evapotranspiración del cultivo (etc)	32
7.3.	Precipitación efectiva.....	33
7.3.1.	Precipitación confiable.....	33
7.4.	Parámetros del diseño agronómico	34
7.4.1.	Agua utilizable y dosis neta de riego	34
7.4.2.	Intervalo y frecuencia de riego	34
7.4.3.	Dosis bruta de riego y necesidades de lavado.....	35
7.5.	Selección de aspersores y marco de riego.....	35
7.6.	Diseño hidráulico del sistema	36
7.7.	Comportamiento hidráulico del sistema	39
7.8.	Estimación de costos y viabilidad.....	39
7.9.	Previsiones del riego inteligente	40
7.10.	Limitaciones del estudio	42
8.	Conclusiones	42
9.	Recomendaciones	43
	Referencias bibliográficas.....	45

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Resumen del diseño hidráulico del sistema por tramo.....	38
Tabla 2. Resumen del presupuesto estimado de inversión del sistema de riego.....	40

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio.	24
Figura 2. Esquema general del diseño hidráulico del sistema de riego por aspersión.	37

Lista de Apéndices

- Apéndice A.** Formulación evapotranspiración de referencia.
- Apéndice B.** Definiciones de parámetros de diseño agronómico.
- Apéndice C.** Formulación diseño agronómico.
- Apéndice D.** Formulaciones diseño hidráulico.
- Apéndice E.** Criterios químicos de selección para las parcelas.
- Apéndice F.** Resultados densidad aparente y conductividad hidráulica.
- Apéndice G.** Capacidad de campo y punto de marchitez permanente.
- Apéndice H.** Balance hídrico mensual.
- Apéndice I.** Resumen de parámetros del diseño agronómico.
- Apéndice J.** Levantamiento topográfico de la línea de conducción.
- Apéndice K.** Análisis físico-químico del suelo de las parcelas de estudio.
- Apéndice L.** Resultados de la curva de retención de humedad del suelo.
- Apéndice M.** Resultados de los análisis físico-químicos y de metales pesados del agua de riego.
- Apéndice N.** Cotizaciones de materiales y equipos.
- Apéndice Ñ.** Flujograma del diseño hidráulico del sistema de riego por aspersión.
- Apéndice O.** Características del sistema de riego inteligente con sensores.
- Apéndice P.** Plano de diseño del sistema de riego por aspersión.

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS

Resumen

Título: Diseño agronómico e hidráulico de un sistema de riego por aspersión para el cultivo de cebolla de rama en el páramo de Berlín *

Autor: Julián Andrés Díaz Duarte, Leidy Katherine Quiroga González **

Palabras Clave: Riego por aspersión, diseño agronómico, *Allium fistulosum*, páramo de Berlín.

Descripción: El páramo de Berlín es un ecosistema estratégico para el abastecimiento hídrico del nororiente colombiano. El cultivo de cebolla de rama (*Allium fistulosum* L.) es una de las principales actividades económicas de sus habitantes. Generalmente, este cultivo se riega por aspersión bajo criterios empíricos que desligan el diseño agronómico del hidráulico, favoreciendo la sobreaplicación y la lixiviación de nitratos. Este trabajo diseñó un sistema de riego por aspersión que integra ambos componentes bajo las condiciones edafoclimáticas del área de estudio, en el municipio Tona (Santander). La metodología se desarrolló en tres fases: caracterización edáfica y diseño agronómico, dimensionamiento hidráulico y evaluación económica. La caracterización reveló un suelo de baja agua utilizable (13.50 mm en los primeros 30 cm) y alta infiltración básica (30.85 cm/d), lo que determinó la implementación de un esquema de riegos ligeros y frecuentes, con dosis neta de 4.05 mm e intervalo de 2 días. La evapotranspiración del cultivo ajustada por Penman-Monteith FAO-56 alcanzó 4.42 mm/día en máxima demanda. Se seleccionó un microaspersor vertical con caudal de diseño de 0.0317 L/s. El dimensionamiento hidráulico, verificado por Darcy-Weisbach (Colebrook-White) y Hazen-William, incorporó una bomba de ariete hidráulico que eleva el agua sin energía externa (altura manométrica 32.35 mca) y un tanque de 2000 L, logrando un margen de cierre positivo de 1.01 mca en la entrada de la parcela. Los resultados confirman la viabilidad técnica del sistema y aportan una herramienta de diseño replicable para mejorar la eficiencia del uso del agua y reducir los impactos ambientales en sistemas productivos de alta montaña.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingeniería Civil. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. PhD. en Ingeniería, énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Codirector: John Jairo Márquez Molina. PhD. en Ciencias Agropecuarias.

Abstract

Title: Agronomic and hydraulic design of a sprinkler irrigation system for green onion cultivation in the Berlin paramo*

Author: Julián Andrés Díaz Duarte, Leidy Katherine Quiroga González**

Key Words: Sprinkler irrigation, agronomic design, hydraulic ram pump, *Allium fistulosum*, Berlin Paramo.

Description: The Berlin moor is a strategic ecosystem for the water supply of northeastern Colombia. The cultivation of green onions (*Allium fistulosum* L.) is one of the main economic activities of the area's inhabitants. Generally, this crop is irrigated by sprinkler systems based on empirical criteria that separate agronomic design from hydraulic design, leading to over-irrigation and nitrate leaching. This study designed a sprinkler irrigation system that integrates both components under the soil and climate conditions of the study area, in the municipality of Tona (Santander). The methodology was developed in three phases: soil characterization and agronomic design, hydraulic sizing, and economic evaluation. The characterization revealed a soil with low usable water (13.50 mm in the top 30 cm) and high basic infiltration (30.85 cm/d), which led to the implementation of a light and frequent irrigation schedule, with a net application rate of 4.05 mm and a 2-day interval. Crop evapotranspiration, adjusted using the Penman-Monteith FAO-56 equation, reached 4.42 mm/day at peak demand. A vertical micro-sprinkler with a design flow rate of 0.0317 L/s was selected. The hydraulic sizing, verified using the Darcy-Weisbach (Colebrook-White) and Hazen-Williams equations, incorporated a hydraulic ram pump that lifts water without external energy (manometric head of 32.35 mca) and a 2000 L tank, achieving a positive head margin of 1.01 mca at the plot inlet. The results confirm the technical feasibility of the system and provide a replicable design tool to improve water use efficiency and reduce environmental impacts in high-mountain production systems.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. PhD in Engineering, with emphasis on Sanitary and Environmental Engineering. Co-director: John Jairo Marquéz Molina. PhD in Agricultural Sciences.

Introducción

Los páramos constituyen ecosistemas estratégicos de alta montaña por su papel en la regulación hídrica y la provisión de servicios ecosistémicos esenciales. Ubicados principalmente en la región tropical andina, actúan como reguladores hídricos al captar, almacenar y liberar gradualmente agua hacia cuencas que abastecen poblaciones urbanas y rurales (Hofstede et al., 2014).

En Colombia, estos ecosistemas son fundamentales para el abastecimiento hídrico del país (Hofstede et al., 2014). No obstante, en muchas zonas altoandinas convergen procesos ecológicos estratégicos y actividades agrícolas que sustentan la economía local, generando tensiones asociadas al uso del suelo y al aprovechamiento del recurso hídrico (Rey-Romero et al., 2022; Sarmiento et al., 2017).

El páramo de Berlín, perteneciente al complejo Jurisdicciones–Santurbán–Berlín, ejemplifica esta interacción. Además de aportar al abastecimiento de agua de importantes centros urbanos de la región nororiental del país (Pérez et al., 2024), alberga sistemas productivos donde el cultivo de cebolla de rama (*Allium fistulosum* L.) constituye una actividad económica relevante para las comunidades locales (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2015) (Oviedo-Ocaña et al., 2022). Debido a su sensibilidad al estrés hídrico, este cultivo requiere un suministro de agua adecuado y técnicamente controlado (Pinzón Ramírez et al., 2012).

En la zona, el riego por aspersión predomina (Oviedo-Ocaña et al., 2022) por su adaptación topográfica y la distribución uniforme del agua (Monge Redondo, 2018; Carrazón Alocén, 2007; Fernandez Gomez, 2010). Sin embargo, suele implementarse con criterios empíricos, sin considerar la evapotranspiración del cultivo, el almacenamiento hídrico del suelo ni los

requerimientos hidráulicos, generando discrepancias entre la oferta y la demanda real y pérdidas por la dinámica del suelo (Naranjo Barrios, 2025; Rey-Romero et al., 2025).

La limitada integración entre el diseño agronómico, que define cuánto y cuándo regar, y el diseño hidráulico, orientado a garantizar una aplicación eficiente del agua, limita el desempeño de los sistemas de riego y aumenta la presión sobre un ecosistema altamente sensible. En este contexto, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles son las características técnicas de un sistema de riego por aspersión para el cultivo de cebolla de rama en el páramo de Berlín, considerando las condiciones hidroclimáticas y agronómicas del área de estudio, así como enfoques de riego inteligente que permitan satisfacer los requerimientos hídricos del cultivo con criterios de eficiencia en el uso del recurso hídrico?

La investigación se articula con el macroproyecto del Grupo de Investigación en Gestión de Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH), enfocado en la producción sostenible de cebolla de rama en el páramo de Berlín. Dicho macroproyecto integra estrategias relacionadas con buenas prácticas agrícolas, optimización del uso de fertilizantes, eficiencia en la aplicación de insumos y reducción de impactos ambientales.

En este contexto, el diseño agronómico e hidráulico del sistema de riego es fundamental para mejorar la eficiencia productiva y el uso sostenible del recurso hídrico, favoreciendo el aprovechamiento de nutrientes y reduciendo pérdidas por lixiviación.

1 Estado del arte

La literatura técnica sobre sistemas de riego en ecosistemas de alta montaña tropical es limitada, lo que evidencia la necesidad de investigaciones orientadas a su diseño bajo condiciones climáticas y edáficas particulares.

En el ámbito regional, Celis Vargas (2022) evaluó los efectos del cambio de uso del suelo sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica en unidades hidrográficas de páramo, encontrando que la extracción no controlada de agua para riego en cultivos de cebolla de rama y papa en el páramo de Berlín puede reducir el caudal base entre un 23 % y un 79 %. De manera complementaria, Ivanova y Marín-Arévalo (2020) determinaron que la demanda hídrica para el riego de cultivos transitorios en el páramo de Rabanal disminuye en un 27,8 % la capacidad de regulación hídrica de la cuenca y aumenta en un 9,92 % la variabilidad temporal del régimen hídrico, evidenciando el impacto del riego sobre la disponibilidad y estabilidad del recurso hídrico.

En el ámbito local, Naranjo Barrios (2025) identificó deficiencias en la operación y manejo del sistema de riego por aspersión, relacionadas con la falta de uniformidad de los aspersores y la aplicación de criterios empíricos para programar el riego. Estas condiciones ocasionaron aplicaciones de agua de hasta 2.6 veces la demanda hídrica del cultivo y pérdidas por percolación del 47.5 %, además de evidenciar que la baja capacidad de retención hídrica y la alta infiltración del suelo requieren una adecuada caracterización para el diseño del sistema. Asimismo, Jaramillo Noreña et al. (2016) reportaron que el riego por aspersión en cultivos de cebolla de rama alcanza eficiencias de aplicación del agua cercanas al 70 %, inferiores a las obtenidas mediante riego por goteo, mientras que Rey-Romero et al. (2025) documentaron que las aplicaciones excesivas de agua favorecen la lixiviación de nitratos hacia aguas superficiales y subterráneas.

Estos antecedentes evidencian que aún persiste la necesidad de desarrollar diseños de riego que integren criterios agronómicos e hidráulicos adaptados a las condiciones edafoclimáticas de los ecosistemas de páramo, con el fin de mejorar la eficiencia en el uso del agua y reducir los impactos ambientales asociados a la actividad agrícola.

2 Planteamiento del problema

Los páramos son ecosistemas estratégicos esenciales en la regulación hídrica, el almacenamiento de carbono, la conservación de la biodiversidad y el abastecimiento de agua para poblaciones urbanas y rurales. Se distribuyen a lo largo de la cordillera de los Andes, ocupando aproximadamente 24 300 km² entre la línea de bosques andinos (3000–3500 m.s.n.m.) y la línea de nieves perpetuas (más de 4000 m.s.n.m.) (Hofstede et al., 2014). En Colombia, aunque representan cerca del 1.7% del territorio nacional, abastecen de agua a aproximadamente 17 millones de personas y satisfacen alrededor del 70% de la demanda hídrica nacional (Hofstede et al., 2014). Sus suelos poseen una elevada capacidad de retención hídrica, permitiendo almacenar agua durante periodos lluviosos y liberarla gradualmente en épocas secas (Gómez Ríos, 2023).

El páramo de Berlín, integrante del complejo Jurisdicciones-Santurbán-Berlín, constituye un ecosistema estratégico para el abastecimiento de agua de ciudades como Bucaramanga, Cúcuta y Pamplona (Pérez et al., 2024). Sin embargo, presenta una importante intervención antrópica asociada a actividades agrícolas, ganaderas y mineras. En la cordillera oriental colombiana se estima que el 20.5% de la superficie de páramo ha sido transformada (Sarmiento et al., 2017), mientras que en el páramo de Berlín cerca del 19.4% de su extensión está ocupada por cultivos de papa, cebolla, pastos y rastrojos (Gómez Ríos, 2023).

El cultivo de cebolla de rama (*Allium fistulosum* L.) es la principal actividad productiva del territorio y fuente de ingresos rural (Oviedo-Ocaña et al., 2022; Agronet, s.f.), con Tona como segundo productor del país (Naranjo Barrios, 2025). Su intensificación ha afectado la biodiversidad y las funciones ecológicas del ecosistema, reduciendo la retención de humedad del suelo y contaminando fuentes hídricas, a lo que se suman los conflictos de uso del suelo derivados de la Ley 1930 de 2018 (Naranjo Barrios, 2025; Gómez Ríos, 2023).

El manejo del cultivo se realiza generalmente mediante riego por aspersión, sin una planificación agronómica e hidráulica que considere las necesidades del cultivo, las características del suelo y los requerimientos de presión y caudal (Monge Redondo, 2018; Carrazón Alocén, 2007; Fernández Gómez et al., 2010). Esta situación favorece la extracción no controlada del recurso hídrico y altera la dinámica hidrológica del páramo, afectando la disponibilidad del agua y la regulación de las cuencas (Celis, 2022; Ivanova & Marín-Arévalo, 2020). Adicionalmente, el abastecimiento mediante sistemas de bombeo genera costos de operación asociados al consumo de energía, lo que puede condicionar la frecuencia de riego y favorecer decisiones basadas en criterios económicos más que en los requerimientos hídricos del cultivo (Naranjo Barrios, 2025).

Las prácticas actuales de riego presentan deficiencias en la aplicación del agua, lo que reduce la eficiencia del sistema y favorece la lixiviación de nutrientes y plaguicidas hacia cuerpos de agua superficiales y subterráneos (Naranjo Barrios, 2025; Rey-Romero et al., 2025). Ante este panorama, resulta necesario desarrollar alternativas que optimicen la gestión del recurso hídrico.

3 Justificación

El páramo de Berlín constituye un ecosistema estratégico para el abastecimiento hídrico de importantes centros urbanos y rurales del nororiente colombiano (Pérez et al., 2024). Su importancia ambiental ha sido reconocida mediante la Ley 99 de 1993, el Decreto 1640 de 2012 y la Ley 1930 de 2018, orientados a la protección, manejo y uso sostenible de estos ecosistemas (Naranjo Barrios, 2025).

A pesar de este marco normativo, las actividades agropecuarias continúan generando presiones sobre el recurso hídrico y el suelo debido al uso ineficiente del agua y la aplicación intensiva de insumos agrícolas (Sarmiento et al., 2017; Rey-Romero et al., 2022). Estas prácticas favorecen la percolación profunda y la lixiviación de nutrientes, afectando la calidad de las aguas superficiales y subterráneas (Rey-Romero et al., 2022; Naranjo Barrios, 2025).

En este contexto, el diseño agronómico e hidráulico del riego permite determinar las necesidades hídricas del cultivo, la frecuencia de aplicación, los caudales requeridos y las condiciones para una distribución eficiente y uniforme del agua, reduciendo las pérdidas por aplicaciones excesivas (Monge Redondo, 2018; Carrazón Alocén, 2007).

La presente investigación se justifica por la necesidad de desarrollar una propuesta técnica para el cultivo de cebolla de rama en el páramo de Berlín, integrando criterios agronómicos e hidráulicos acordes con las condiciones del área de estudio. Sus resultados contribuirán a optimizar el manejo del agua en sistemas productivos de alta montaña y a promover un uso más eficiente del recurso hídrico en un ecosistema de especial importancia ambiental.

4 Objetivos

4.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de riego por aspersión para el cultivo de cebolla de rama en el páramo de Berlín, que asegure el cumplimiento de los requerimientos agronómicos e hidráulicos bajo condiciones climáticas y edáficas específicas en parcelas experimentales, considerando el enfoque de riego inteligente.

4.2 Objetivos Específicos

- Definir los parámetros para el diseño agronómico del sistema de riego para el cultivo de cebolla de rama, considerando la demanda hídrica del cultivo y las condiciones de suelo.
- Dimensionar hidráulicamente el sistema de riego, incluyendo la captación, el almacenamiento, la impulsión y la red de distribución por aspersión, cumpliendo con los criterios de caudal, presión, pérdidas de carga y uniformidad.
- Evaluar la viabilidad técnica y económica del sistema de riego por aspersión en el páramo de Berlín.

5 Marco Teórico

5.1 Marco referencial

5.1.1 Ecosistemas de páramo

El páramo es un ecosistema de alta montaña localizado entre el límite superior del bosque andino (3000–3800 m.s.n.m.) y la línea de nieves perpetuas (4400–4800 m.s.n.m.) en regiones de América Central y del Sur (Hofstede, 1995). Se caracteriza por su importancia en la regulación hídrica y la provisión de servicios ecosistémicos esenciales para las poblaciones que dependen del agua para consumo y actividades productivas (Oviedo-Ocaña et al., 2022).

En Colombia, estos ecosistemas han experimentado procesos de transformación asociados principalmente a la expansión de la agricultura, la ganadería y la minería. El páramo de Berlín, perteneciente al complejo Jurisdicciones-Santurbán-Berlín, constituye una fuente estratégica de abastecimiento de agua para los departamentos de Santander y Norte de Santander, suministrando agua a centros urbanos como Bucaramanga, Cúcuta y Pamplona (Pérez et al., 2024).

5.1.2 Condiciones climáticas del páramo

El páramo de Berlín presenta condiciones de baja temperatura, alta humedad relativa y fuertes vientos: radiación media de 487.9 MJ/m²/mes, humedad relativa de 86.4%, temperatura de 8.9 °C y viento de 4.28 m/s (Gómez, 2023, citado en Rey-Romero et al., 2025). Asimismo, presenta un régimen bimodal de precipitación, con periodos secos entre diciembre y febrero y entre junio y agosto, y temporadas lluviosas de marzo a mayo y de septiembre a noviembre (Rey-Romero et al., 2025).

5.1.3 Cebolla de rama (*Allium fistulosum* L.)

La cebolla de rama (*Allium fistulosum* L.) es una hortícola que se adapta a climas fríos y húmedos de alta montaña, y en el páramo de Berlín constituye una de las principales actividades agrícolas y fuente de ingresos rural (Oviedo-Ocaña et al., 2022; Agronet, s.f.).

El cultivo posee un contenido de agua cercano al 85%, por lo que requiere un suministro hídrico adecuado para mantener su productividad. Aunque la cebolla en rama puede resistir periodos de sequía, su rendimiento disminuye significativamente bajo condiciones de estrés hídrico (Pinzón Ramírez et al., 2012).

- **Condiciones edáficas para el desarrollo del cultivo**

La cebolla de rama crece de forma óptima en suelos de textura franca a franco-arcillosa, con una profundidad efectiva de 45 cm, materia orgánica media a alta, pH 6.0–7.0 y temperaturas

cercanas a 10 °C (Jaramillo Noreña et al., 2016; Galindo Pacheco et al., 2024, Romano & Zhang, 2011; Nile et al., 2018). Requiere mantener la humedad cercana a capacidad de campo, evitando déficits y excesos; sus requerimientos de riego oscilan entre 12 y 20 mm semanales según el clima, suelo y etapa fenológica (Pinzón Ramírez et al., 2012).

5.1.4 Relación agua – suelo - planta

5.1.4.1 Evapotranspiración de referencia (ET_o)

La evapotranspiración es el agua que retorna a la atmósfera por evaporación del suelo y transpiración de las plantas (Monge Redondo, 2018). La evapotranspiración de referencia (ET_o) estima la demanda evaporativa atmosférica mediante un cultivo hipotético, definido como una superficie extensa de pasto de 0.12 m de altura, albedo 0.23 y resistencia superficial de 70 s/m, que cubre totalmente el suelo con acceso ilimitado al agua (Gómez Ríos, 2023).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) recomienda la ecuación de Penman-Monteith como el método estándar para la estimación de la ET_o (Monge Redondo, 2018; Naranjo Barrios, 2025). La ecuación se expresa como:

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

Donde R_n es la radiación neta, G el flujo de calor del suelo, T la temperatura media a 2 m, u₂ la velocidad del viento a 2 m, (e_s – e_a) el déficit de presión de vapor, Δ la pendiente de la curva de presión de vapor y γ la constante psicrométrica; las ecuaciones auxiliares se detallan en la Tabla A1 (Apéndice A) (Allen et al., 2006)

5.1.4.2 Evapotranspiración del cultivo (ET_c)

Los requerimientos hídricos de un cultivo se expresan mediante la evapotranspiración del cultivo (ET_c), calculada bajo condiciones estándar de desarrollo, es decir, en ausencia de

enfermedades, con fertilización adecuada y condiciones óptimas de humedad en el suelo (Allen et al., 2006). La ET_c se determina mediante la siguiente relación:

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

El K_c varía según la etapa fenológica del cultivo (inicial, desarrollo, mediados de temporada y final), aumentando hasta su valor máximo en pleno desarrollo y disminuyendo hacia la cosecha (Allen et al., 2006). Para la cebolla de rama, la FAO reporta $K_{c\text{inicial}} = 0.70$, $K_{c\text{medio}} = 1.05$ y $K_{c\text{final}} = 0.95$, aunque estos valores deben ajustarse cuando la humedad relativa y la velocidad del viento difieren de las condiciones estándar (humedad relativa mínima promedio de alrededor de 45% y velocidades del viento cercanas a 2 m/s), como ocurre en el páramo de Berlín.

5.1.4.3 Precipitación efectiva

La precipitación efectiva (Pe) es la fracción de lluvia que se infiltra y queda disponible para el cultivo, descontando escorrentía, evaporación y percolación (Carrazón Alocén, 2007); depende de la cobertura, textura, intensidad y duración de la lluvia (Ali & Mubarak, 2017; OMM-N-168, 2011, citado en Naranjo Barrios, 2025).

5.1.5 Riego por aspersión

El riego por aspersión aplica agua en forma de lluvia artificial mediante tuberías y aspersores a presión, buscando una distribución uniforme que simula la precipitación natural (Fernández Gómez et al., 2010). Su eficiencia de aplicación oscila entre 65% y 85% según el diseño y la operación, reduciéndose por viento, evaporación y radiación (Monge Redondo, 2018; Chen et al., 2019).

5.1.6 Diseño agronómico de riego por aspersión

El diseño consiste en determinar los parámetros necesarios para que el sistema sea capaz de suministrar agua al cultivo de manera adecuada, especialmente durante los periodos de máxima

demanda hídrica, evitando condiciones de déficit que afecten su desarrollo (Fernandez Gomez, 2010). En este sentido, se busca calcular la cantidad de agua requerida para garantizar un crecimiento óptimo y mantener condiciones favorables en la zona radicular.

La estimación de las necesidades hídricas se fundamenta principalmente en evapotranspiración del cultivo y los aportes de precipitación, lo que permite calcular la lámina de riego necesaria para suplir el déficit de agua en el suelo. Las propiedades edáficas, agronómicas y operativas requeridas para el diseño agronómico (Tabla B1, Apéndice B), así como las ecuaciones empleadas para el cálculo de cada uno de los parámetros (Tabla C1, Apéndice C) se muestran allí.

5.1.7 *Diseño hidráulico de riego por aspersión*

El diseño hidráulico tiene como objetivo dimensionar la red de distribución del sistema de riego de tal manera que todos los aspersores operen dentro de un rango de presión que garantice una variación de caudal aceptable y, por consiguiente, una uniformidad de aplicación adecuada.

5.1.7.1 Criterio de diseño

En aspersión se admite una variación de caudal del 10% en el ramal, equivalente a una diferencia de presiones del 20% para aspersores estándar (exponente $x = 0.5$); por tanto, la pérdida de carga en el ramal (hr) debe ser igual o menor a un quinto de la presión nominal del aspersor (Monge Redondo, 2018).

5.1.7.2 Pérdidas de cargas

Las pérdidas de carga en las tuberías del sistema de riego comprenden las pérdidas por fricción continua a lo largo de la conducción y las pérdidas localizadas generadas por accesorios, conexiones y cambios de dirección.

Las pérdidas por fricción continua se calcularon mediante las ecuaciones de Hazen-Williams (Tabla D1, Apéndice D), con $C = 150$ para polietileno y $C = 130$ para acero galvanizado,

y Darcy-Weisbach (Tabla D2, Apéndice D), cuyo factor de fricción se obtuvo iterando la ecuación de Colebrook-White. Esta última es más rigurosa para diámetros reducidos y regímenes de transición, característicos del miniriego, donde Hazen-Williams tiende a subestimar las pérdidas (Monge Redondo, 2018).

5.1.7.3 Presión de entrada en el ramal

La presión que debe suministrarse en el punto de alimentación del ramal lateral se calcula mediante la siguiente expresión:

$$P_o = P_N + 0.75h_r \pm \frac{\Delta Z}{2} + H_a \quad (3)$$

Donde P_o es la presión en el origen del ramal (mca), P_N es la presión nominal del aspersor (mca), h_r es la pérdida de carga en el ramal (mca), ΔZ es el desnivel geométrico entre los extremos del ramal (positivo si asciende, negativo si desciende) y H_a es la altura del tubo porta-aspersor incluyendo sus pérdidas de carga (Monge Redondo, 2018).

6 Metodología

La metodología se desarrolló bajo un enfoque secuencial que integró criterios agronómicos e hidráulicos para el diseño de un sistema de riego por aspersión para cebolla de rama en el páramo de Berlín. Este enfoque relacionó las condiciones edafoclimáticas del área de estudio con los requerimientos hídricos del cultivo y los parámetros necesarios para el dimensionamiento del sistema.

El proceso se estructuró en tres fases: (i) caracterización del área de estudio y diseño agronómico, mediante el análisis de variables climáticas y del suelo para estimar los requerimientos hídricos del cultivo; (ii) diseño hidráulico, donde se determinaron el caudal, las pérdidas de carga, la altura manométrica y la distribución de los aspersores; y (iii) evaluación de

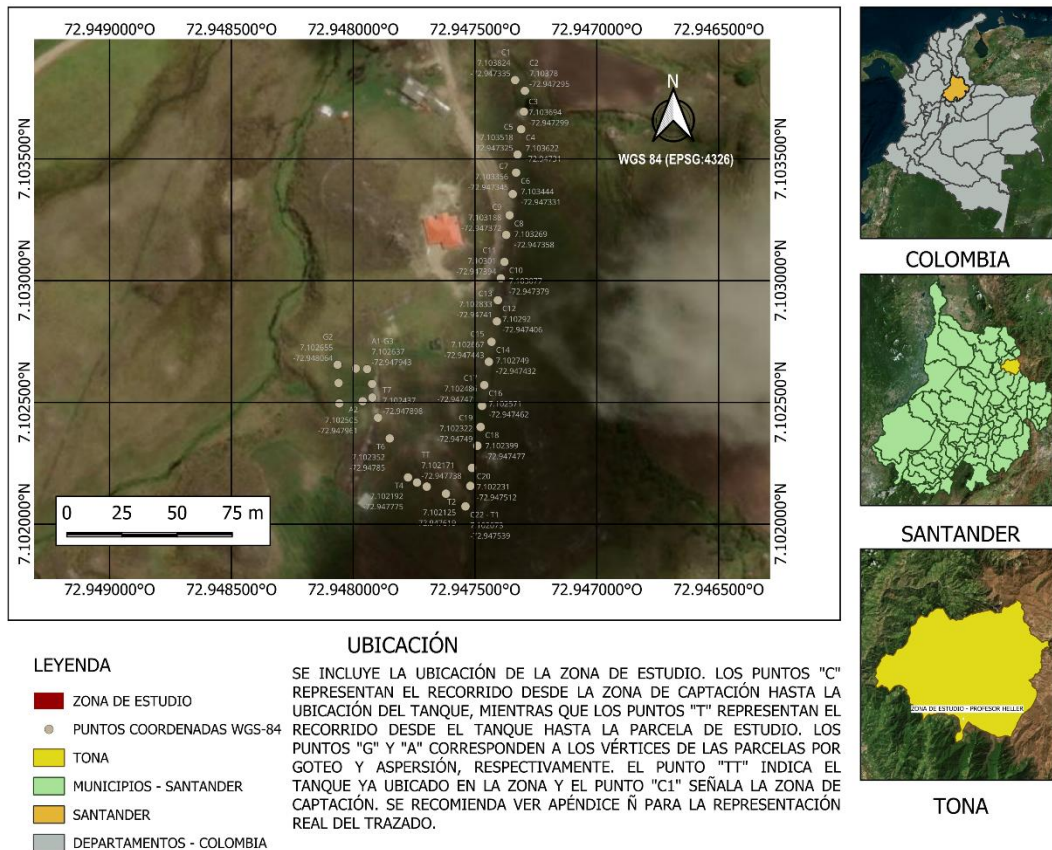
costos y viabilidad técnica y económica del sistema para analizar su factibilidad de implementación.

6.1.1 Zona de estudio

La zona de estudio correspondió a una unidad productiva de cebolla de rama ubicada en las veredas Parra y Juan Rodríguez, corregimiento de Berlín, municipio de Tona, departamento de Santander. El área se localizó en las coordenadas 7.102263 (7° 6' 7.89'' N) y -72.948233 (72° 56' 53.51'' O), a una altitud aproximada de 3.450 msnm.

La investigación se desarrolló en un predio, donde se establecerán las parcelas experimentales para la ejecución del proyecto.

De acuerdo con la caracterización realizada por Rey-Romero et al. (2025) en una unidad hidrográfica de 207 ha ubicada en las veredas Parra Juan Rodríguez y Arenales, municipio de Tona, la cebolla de rama constituye la actividad agrícola predominante (100 % de las unidades productivas), seguida del cultivo de papa (43 %), la ganadería extensiva (26 %), los cultivos no permanentes (12 %), la piscicultura (4 %) y las áreas destinadas a conservación (17 %).

Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio.

Nota: Autores

6.2 Fase I: Reconocimiento del área de estudio y diseño agronómico

6.2.1 Actividades previas

El día 27/01/2026 se realizó una visita técnica a la zona de estudio con el fin de efectuar el reconocimiento del área y recopilar información para la selección de las parcelas experimentales. Se realizó el levantamiento topográfico básico con GPS (Apéndice J) y se obtuvieron seis muestras de suelo con barreno holandés en dos parcelas (profundidades 0–20, 20–40 y 40–60 cm), enviadas al laboratorio de AGROSAVIA para su análisis físico-químico (Tablas K1 y K2, Apéndice K).

6.2.2 Selección subparcelas

Se definió la parcela experimental en un marco de 8×8 m subdividido en subparcelas de 2×3 m. La selección consideró representatividad, uniformidad, accesibilidad y condiciones fisicoquímicas del suelo, evaluadas mediante la metodología tipo “semáforo” de Galindo Pacheco et al., (2024), que clasifica los parámetros edáficos como favorables, intermedios o restrictivos (Tabla E1, Apéndice E).

6.2.3 Análisis de datos climáticos

Para la caracterización climática del área de estudio se utilizaron registros de estaciones meteorológicas operadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología Estudios Ambientales (IDEAM), seleccionadas por su proximidad y representatividad de las condiciones ambientales del páramo de Berlín. Las estaciones consideradas fueron Picacho (23190300), de tipo pluviométrico, ubicada a 3.310 msnm, y Berlín (37015020 – 37015030), de tipo climática, localizadas a 3.214 msnm y 3.306 msnm, respectivamente.

Paralelamente, se empleó información meteorológica generada en investigaciones previas desarrolladas por la Universidad Industrial de Santander (UIS) – (GPH). Se utilizaron los registros recopilados por Gómez Ríos (2003) para el periodo comprendido entre el 01/08/2019 y el 13/05/2022, así como los obtenidos por Naranjo Barrios (2025) entre el 01/10/2023 y el 30/04/2024.

Los registros empleados incluyeron variables de precipitación, temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento y punto de rocío. Posteriormente, la información fue organizada y depurada para caracterizar el comportamiento climático predominante del área de estudio y servir como base para la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_0).

6.2.4 *Evapotranspiración*

La evapotranspiración de referencia (ET_o) se determinó mediante la metodología propuesta por la FAO, empleando la ecuación de Penman-Monteith FAO-56 y los registros climáticos diarios analizados previamente. A partir de esta información, se calcularon los valores diarios para un periodo anual para establecer las condiciones hídricas requeridas siguiendo la formulación presentada en el Apéndice A.

6.2.5 *Diseño Agronómico del sistema de riego*

El diseño agronómico se desarrolló siguiendo las metodologías de Monge Redondo (2018), Carrazón Alocén (2007), Fernández Gómez et al. (2010) y los lineamientos FAO-56 (Allen et al., 2006), adoptando una profundidad radicular efectiva (Pr) de 0.30 m y una fracción de agotamiento permisible (DPM) del 30%. El 15/04/2026 se delimitó la parcela y se realizó la caracterización físico-hídrica del suelo mediante el análisis de nueve muestras: seis en la UIS para determinar la densidad aparente (Tabla F1, Apéndice F) y tres en AGROSAVIA para la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) (Tablas G1 y L1, Apéndices G y L).

Asimismo, se realizaron ensayos de infiltración con infiltrómetro de minidisco para estimar la infiltración básica del suelo (I_b) (Tabla F2, Apéndice F) y se recolectaron muestras de agua para evaluar su calidad para riego (Tablas M1 y M2, Apéndice M). Con esta información se determinaron las necesidades netas y brutas de riego, incluyendo la precipitación efectiva, el agua utilizable del suelo, la dosis neta y bruta de riego, el intervalo máximo entre riegos y el caudal mínimo requerido (Tabla C1, Apéndice C). Estos resultados permitieron seleccionar preliminarmente el aspersor y definir el tiempo y la frecuencia de riego, constituyendo la base del diseño hidráulico.

6.3 Fase II: Diseño hidráulico del sistema de riego por aspersión

6.3.1 Actividades previas

El 24/05/2026 se realizó una visita técnica al área de estudio para reconocer el sistema de abastecimiento y recopilar la información necesaria para el diseño hidráulico. Durante la visita se efectuó el aforo del caudal en la zona de captación para determinar el caudal disponible para la bomba de ariete. Asimismo, se inspeccionaron los accesorios y elementos de la línea de conducción y se realizó el recorrido desde la captación hasta el tanque de almacenamiento y la parcela experimental, con el fin de estimar las longitudes de conducción y verificar las condiciones topográficas del trayecto (Apéndice J).

6.3.2 Diseño hidráulico del sistema de riego

A partir de los parámetros del diseño agronómico, se dimensionó el sistema hidráulico para garantizar que todos los aspersores operaran dentro del rango de presión admisible, con una variación del caudal inferior al 10% (Monge Redondo, 2018). El procedimiento metodológico seguido para el diseño hidráulico se resume en el flujograma presentado en la Figura Ñ1 del Apéndice Ñ, mientras que a continuación se describen las principales etapas del proceso. El procedimiento comprendió la selección del aspersor, la determinación del caudal de diseño, el dimensionamiento del sistema de impulsión, almacenamiento y red de distribución.

6.3.2.1 Selección del aspersor y marco de riego

El aspersor se seleccionó verificando que su pluviometría no superara la admisible del suelo, calculada como el producto de la infiltración básica (I_b) por el factor de reducción por pendiente ($f_p = 0.60$ para pendientes $> 20\%$), además con la compatibilidad de la presión de operación y el diámetro húmedo. El marco de riego se definió con separación máxima de $0.60 \times D_h$

(Carrazón Alocén, 2007), ajustada según la velocidad del viento (Monge Redondo, 2018) para garantizar la uniformidad.

El caudal de diseño se calculó como

$$Q_d = n_{asp} \times q_{asp} \quad (4)$$

Donde n_{asp} es el número de aspersores simultáneos y q_{asp} el caudal unitario a la presión de operación.

6.3.2.2 Configuración y componentes del sistema

El sistema se configuró con los siguientes componentes en sentido del flujo: captación, línea de conducción, ariete hidráulico, línea de impulsión, tanque de almacenamiento y red de distribución por gravedad hasta los aspersores.

El dimensionamiento del ariete hidráulico se realizó mediante la relación de sene (Orrego Monsalve, 2020), considerando el caudal de entrega del sistema, expresado mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{Imp} = Q_{Motriz} \times \eta \times \frac{h}{H} \quad (5)$$

Donde Q_{motriz} corresponde al caudal de alimentación, η representa la eficiencia del ariete hidráulico, h es la altura de elevación o bombeo y H la altura de caída disponible.

El volumen del tanque de almacenamiento se determinó mediante la siguiente expresión:

$$V_T = 2(Q_{asp} \cdot n_{asp} \cdot t_a) \quad (6)$$

Donde V_t corresponde al volumen del tanque, Q_{asp} es el caudal demandado por cada aspersor, n_{asp} representa el número de aspersores y t_a corresponde al tiempo de aplicación. El valor de 2 se incorporó con el fin de considerar posteriormente un sistema de riego adicional.

6.3.2.3 Dimensionamiento de la red de distribución

La red de distribución se dimensionó por gravedad desde el tanque, en sentido inverso al flujo, iniciando en el ramal lateral, continuando con la tubería secundaria y finalizando en la principal, garantizando en cada tramo la presión requerida aguas abajo. Las pérdidas de carga continuas se calcularon mediante las ecuaciones de Hazen-Williams y Darcy-Weisbach para tuberías de polietileno. En los ramales laterales y la tubería secundaria, donde el caudal disminuye progresivamente por efecto de las salidas, se aplicó el factor de Christiansen (Fr) para corregir la pérdida de carga real (Tabla D3, Apéndice D). Finalmente, los diámetros comerciales se seleccionaron verificando velocidades de 0.5–3.0 m/s en tuberías principales y de 0.5–2.0 m/s en ramales (Monge Redondo, 2018), además de garantizar presiones superiores a las requeridas aguas abajo; cuando estas condiciones no se cumplían con el diámetro mínimo, se priorizó el margen de presión, previendo purgas periódicas frente a la sedimentación.

6.4 Fase III: Evaluación económica y viabilidad del sistema de riego

La Fase III articuló los resultados del dimensionamiento hidráulico con criterios técnicos y económicos para evaluar la viabilidad del sistema. La evaluación técnica se basó en un inventario de componentes y accesorios por tramo (motriz, impulsión, principal, secundaria y ramales laterales), elaborado según la función hidráulica de cada elemento y los coeficientes de pérdida localizada reportados por Linares Ojeda (2012). En cada tramo se verificó el cumplimiento de las velocidades admisibles, la disponibilidad de presión aguas abajo y el cierre del balance de energía en la presión nominal del aspersor. Las pérdidas continuas se calcularon mediante Darcy-Weisbach, utilizando el factor de fricción obtenido con la ecuación de Colebrook-White, y se compararon con Hazen-Williams para verificar la consistencia entre ambos métodos.

La evaluación económica consistió en la estimación de la inversión inicial para un diseño en fase de planificación, estructurando el presupuesto en equipos y herramientas, materiales, mano de obra y transporte. Los costos de operación consideraron la autonomía energética de la bomba de ariete, eliminando el consumo de energía y limitando los gastos al mantenimiento del sistema, purgas periódicas y reemplazo de elementos consumibles. Finalmente, la viabilidad técnica se estableció mediante el cumplimiento del balance de presión, las velocidades admisibles, la compatibilidad entre la intensidad de aplicación del aspersor y la infiltración básica del suelo, y la sostenibilidad operativa del sistema.

7 Análisis y discusión de resultados

7.1 Caracterización edáfica de la subparcela de estudio

7.1.1 *Textura y densidad aparente del suelo*

El análisis granulométrico (Bouyoucos) evidenció variación textural en el perfil: la capa superficial (0–20 cm) fue franca (arena 45.45%, limo 28.55% y arcilla 26.00%), mientras que las capas 20–40 y 40–60 cm fueron franco-arenosas, con mayor contenido de arena (57.31% y 63.84%) y menor proporción de arcilla (16.87% y 15.89%) y limo (25.82% y 20.27%).

La densidad aparente (d_a) se determinó mediante el método del cilindro en la UIS (Tabla F1, Apéndice F), con tres réplicas por profundidad. Para la profundidad radicular de 0.30 m (Allen et al., 2006), la d_a representativa correspondió al promedio ponderado de las capas 0–20 y 20–40 cm, con un valor de 0.792 g/cm^3 , característico de suelos con alto contenido de materia orgánica (Hofstede et al., 2014). El incremento en la capa 40–60 cm (1.525 g/cm^3) indica un horizonte mineral con menor contenido de M.O., consistente con el análisis químico (3.81%).

7.1.2 Capacidad de campo y punto de marchitez permanente

La capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) se determinaron a partir de la curva de retención hídrica obtenida mediante cámaras de succión en el laboratorio de AGROSAVIA (Tabla L1, Apéndice L). Los valores corresponden a succiones de 33 kpa (CC) y 1500 kpa (PMP) (Tabla G1, Apéndice G).

Para el diseño agronómico, los valores representativos del perfil 0–30 cm se calcularon como el promedio de las capas 0–20 cm y 20–40 cm, obteniéndose una CC de 50.28% y un PMP de 44.60% en base gravimétrica. La diferencia entre CC y PMP genera un intervalo de humedad disponible (IHD) de 5.68 puntos porcentuales. Esta condición indica una baja capacidad de almacenamiento de agua útil y, en consecuencia, intervalos de riego cortos y láminas reducidas.

7.1.3 Infiltración básica del suelo

La infiltración básica (Ib) se determinó mediante ensayos con infiltrómetro de minidisco en tres profundidades representativas del perfil. Con los datos obtenidos se calculó la conductividad hidráulica no saturada $K(h = -2 \text{ cm})$ mediante el modelo de Zhang (1997) y la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) mediante el modelo de Gardner (1958), utilizando valores del parámetro α de Carsel y Parrish (1988) para las texturas correspondientes (Tabla F2, Apéndice F).

El promedio de las capas de 0–20 cm y 20–40 cm fue de 30.85 cm/d de conductividad hidráulica, equivalente a una infiltración básica de 12.86 mm/h, valor que indica una infiltración moderadamente alta, consistente con la textura franca a franco-arenosa y el elevado contenido de materia orgánica. En el diseño del sistema de riego, esta infiltración básica estableció el límite

máximo de la intensidad de aplicación del aspersor para evitar encharcamiento y escorrentía superficial.

7.2 Evapotranspiración de referencia y del cultivo

7.2.1 *Evapotranspiración de referencia (ET_o)*

La evapotranspiración de referencia (ET_o) se estimó mediante la ecuación de Penman-Monteith FAO-56, utilizando registros climáticos diarios entre el 01/08/2019 y el 30/04/2025. Las variables empleadas incluyeron radiación solar, temperatura media, máxima y mínima del aire, humedad relativa y velocidad del viento a 2 m. A partir de los datos diarios se determinaron los máximos mensuales, presentados en la Tabla H1 (Apéndice H).

La ET_o máxima se registró en febrero (4.11 mm/día) y la mínima en noviembre (3.16 mm/día), con un promedio anual de 3.68 mm/día. Estos valores son consistentes con las condiciones del páramo de Berlín, donde la alta radiación es compensada por las bajas temperaturas y la elevada humedad, moderando la demanda evaporativa.

7.2.2 *Coeficiente de cultivo y evapotranspiración del cultivo (ET_c)*

Para estimar la evapotranspiración del cultivo se adoptaron los coeficientes de cultivo (K_c) recomendados por la FAO para hortalizas pequeñas, con valores de K_{c_{inicial}} = 0.70, K_{c_{medio}} = 1.00 y K_{c_{final}} = 1.00, considerando un ciclo de 180 días distribuido en cuatro fases fenológicas: inicial (30 días), desarrollo (55 días), media estación (55 días) y final (40 días).

Dado que las condiciones climáticas del páramo de Berlín difieren de las estándar FAO, se ajustó el coeficiente K_{c_{medio}} conforme a la metodología FAO-56. Con una humedad relativa mínima promedio de 66.71%, una velocidad media del viento de 1.26 m/s y una altura máxima del cultivo de 0.30 m, el K_{c_{medio}} ajustado fue de 1.075.

El diseño agronómico se fundamentó en la condición de máxima demanda hídrica, correspondiente a la etapa de media estación. Al aplicar el $K_{c_{medio}}$ ajustado a la E_{To} máxima registrada (febrero, 4.11 mm/día), la evapotranspiración ajustada del cultivo (E_{Tc}) fue de 4.42 mm/día.

7.3 Precipitación efectiva

7.3.1 Precipitación confiable

El análisis de precipitación se basó en registros mensuales de la estación Picacho (IDEAM) para el periodo 1986–2025, correspondientes a 40 años de datos. La precipitación promedio anual fue de 1457.15 mm. Para establecer la precipitación confiable, se adoptó una probabilidad de excedencia del 85%, dada la importancia de la unidad productiva para el sustento de los agricultores locales.

El índice de precipitación (I_p) al 85% de probabilidad se determinó mediante interpolación lineal de la serie ordenada, obteniéndose un valor de 0.728. Este índice permite estimar la precipitación mensual con un 85% de probabilidad de excedencia, proporcionando un criterio conservador para el diseño del riego.

7.3.1.1 Precipitación efectiva mensual

A partir de la precipitación mensual con probabilidad de excedencia del 85 %, se estimó la precipitación efectiva (P_e) mediante el método del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (USSCS), aplicando las ecuaciones (C2) y (C3) del Apéndice C. Los resultados se presentan en la Tabla II (Apéndice I).

Los valores negativos de las necesidades netas (N_n) (Tabla H1, Apéndice H) indican que la precipitación efectiva supera la demanda hídrica del cultivo, por lo que no se requiere riego complementario. En contraste, las necesidades netas fueron positivas únicamente entre abril y

julio, alcanzando un máximo de 1.49 mm/día en mayo. Este periodo coincide con la primera temporada seca del área de estudio y define el escenario de diseño del sistema de riego.

7.4 Parámetros del diseño agronómico

A partir de las propiedades físicas e hidrofísicas del suelo, la demanda hídrica del cultivo y la precipitación efectiva, se determinaron los parámetros del diseño agronómico del sistema de riego (Tabla I1, Apéndice I).

7.4.1 *Agua utilizable y dosis neta de riego*

El agua utilizable (AU) del perfil de suelo en los primeros 30 cm resultó en 13.50 mm, calculada mediante la Ecuación C4 (Apéndice C) como el producto de la diferencia entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP), la densidad aparente (0.792 g/cm^3) y la profundidad radicular efectiva (0.30 m). Este valor es considerablemente inferior a los intervalos reportados en la literatura para suelos agrícolas de textura franco-arenosa (90–140 mm/m) y franca (135–180 mm/m) (Monge Redondo, 2018). Estos resultados evidencian la baja capacidad de almacenamiento de agua del suelo estudiado, lo que justifica la necesidad de programar riegos frecuentes y con láminas reducidas.

7.4.2 *Intervalo y frecuencia de riego*

El máximo intervalo entre riegos (IM) se obtuvo como el cociente entre la dosis neta (4.05 mm) y las necesidades netas máximas (1.49 mm/día), resultando en 2.72 días. Al redondear al entero inferior, se adoptó un intervalo de riego (I) de 2 días, con una frecuencia de aplicación día de por medio. Este intervalo responde a la baja agua utilizable (AU), por lo que el sistema debe operar con alta frecuencia y láminas reducidas, acorde con la estrategia de riegos ligeros y frecuentes recomendada para suelos de baja capacidad de almacenamiento (Monge Redondo, 2018).

7.4.3 Dosis bruta de riego y necesidades de lavado

La dosis neta ajustada al intervalo de riego adoptado ($I = 2$ días) fue de 2.97 mm, valor inferior a la dosis neta máxima del suelo (4.05 mm), garantizando que la humedad se mantenga dentro del rango de agua fácilmente aprovechable durante el ciclo de riego.

Las necesidades de lavado (NL) se calcularon a partir de la conductividad eléctrica del agua de riego ($CE_a = 0.03$ ds/m), la conductividad eléctrica máxima del suelo ($CE_{exmáx} = 0.27$ ds/m) y una eficiencia de lavado de 0.85 para suelos de textura media. El requerimiento obtenido fue de 2.67 %, indicando una excelente calidad del agua y un efecto poco significativo sobre la lámina bruta de riego.

Con una eficiencia de aplicación del 75 %, la dosis bruta de riego fue de 4.07 mm, mientras que el tiempo mínimo de aplicación, calculado a partir de la infiltración básica (12.86 mm/h) corregida por el factor de pendiente (0.60), fue de 0.58 h (≈ 35 min).

7.5 Selección de aspersores y marco de riego

Con base en la infiltración básica (30.85cm/d) y el factor de reducción por pendiente ($f_p = 0.60$), se estableció la pluviometría máxima admisible del sistema. Se seleccionó el aspersor MINI WOBBLER VERTICAL #4 CELESTE 114 L/H 0.0317 (Radio de 4.25m a 1.38 bar y 0.46 m de altura, conexión $\frac{1}{2}$ " HE).

El marco de riego se definió en una disposición cuadrada de 8×8 m, equivalente al 60 % del diámetro húmedo del aspersor, de acuerdo con la metodología propuesta por Monge Redondo, (2018), para marcos cuadrados. Sobre la parcela se distribuyeron nueve aspersores en un arreglo de 3×3 , alimentados por tres ramales laterales con tres emisores cada uno, obteniéndose un caudal de diseño de 0.285 L/s (1 026 L/h). Aunque la velocidad media del viento registrada en la zona de estudio (1,31 m/s) fue inferior al rango (3–6 m/s) a partir del cual Monge recomienda reducir el

espaciamiento entre aspersores, se adoptó una reducción del 10 %, correspondiente al valor mínimo sugerido por dicha metodología, como criterio de diseño conservador. Esta decisión tuvo como propósito incrementar el solape entre aspersores y proporcionar un margen de seguridad frente a posibles variaciones o ráfagas de viento que pudieran afectar la uniformidad de aplicación del riego.

7.6 Diseño hidráulico del sistema

El dimensionamiento se desarrolló en sentido inverso al flujo, partiendo de la presión nominal del aspersor (14.07 mca) hacia la captación. Por tramo se determinó la pérdida admisible por balance de energía, se calculó el diámetro mínimo y se adoptó el comercial inmediatamente superior, verificando la velocidad (0.5–3 m/s) y que la pérdida no superara lo admisible. El factor de fricción de Darcy-Weisbach se obtuvo iterando Colebrook-White, con convergencia en todos los tramos (Tabla 1).

La Figura 2 presenta el esquema general del diseño hidráulico del sistema de riego, incluyendo el trazado de las conducciones desde la captación hasta la parcela experimental, la distribución de la red, la ubicación y el solape de los aspersores, la división de las subparcelas y la representación del perfil del ramal lateral. A su vez, en el Apéndice P (Figura P1) se presenta el plano detallado del sistema, el cual incluye la simbología de los componentes, el resumen de los parámetros hidráulicos y agronómicos, el cuadro de coordenadas de los puntos de control y demás detalles constructivos utilizados para el diseño.

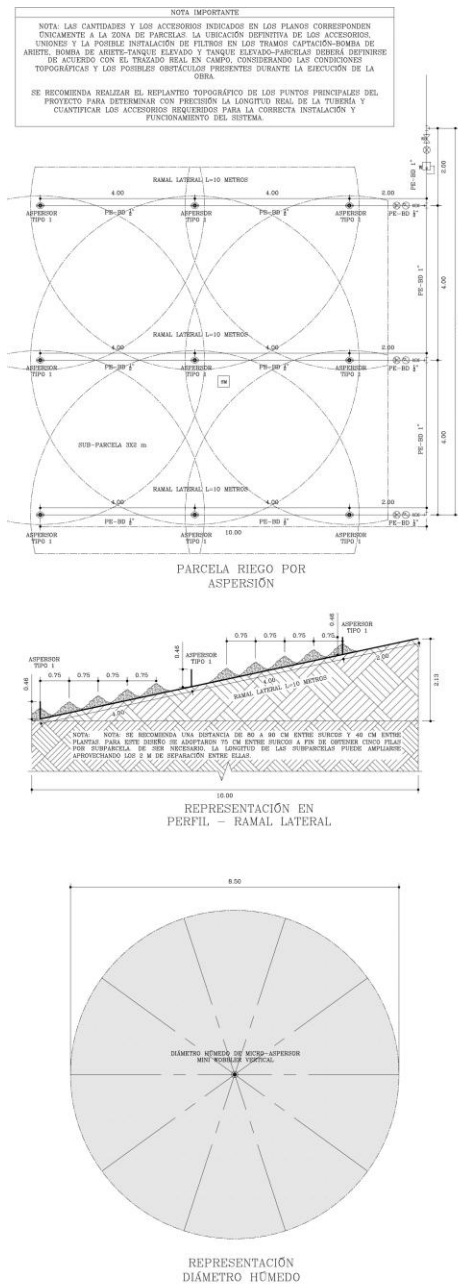
Figura 2. Esquema general del diseño hidráulico del sistema de riego por aspersión.*Nota: Autores*

Tabla 1. Resumen del diseño hidráulico del sistema por tramo.

Tramo	Material / Ø	L (m)	Q (L/s)	V (m/s)	ΣK	H _f (mca)	Presión / Margen (mca)
Ramal lateral (3 asp.)	PE-BD, ½"	10.0	0.095	0.750	3.25	0.441	P. Entrada ramal = 13.94
Tubería secundaria	PE-BD, 1"	10.0	0.285	0.562	19.45	0.401	P. Inicio secundaria = 14.34
Tubería principal	PE-BD, 1"	80.0	0.285	0.562	5.65	1.629	P. Entrada parcela = 15.35; margen +1.01
Impulsión (ariete–tanque)	PE-BD PN-6, ½"	235.0	0.027	0.214	6.25	1.349	H. Man imp = 32.35
Motriz (captación–ariete)	Acero galv., 1½"	25.0	0.701	0.615	2.5	0.386	P. Entrada ariete = 2.59

Nota. Cotas del sistema: captación 3442, ariete 3439, tanque 3467 y parcela 3450 m.s.n.m. Desniveles: fuente-ariete 3 m, ariete-tanque 31 m y tanque-parcela 17 m. Caudal de diseño $Q_d = 0.285$ L/s (9 aspersores); caudal motriz 0.701 L/s; eficiencia del ariete $\eta = 0.40$ ($h/H = 10.33$). El detalle de accesorios por tramo y la comparación Hazen-Williams / Darcy-Weisbach se presentan en la Tabla D5, (Apéndice D).

La bomba de ariete hidráulico, de la cual se derivan las conducciones motrices y de impulsión, opera con un caudal motriz de 0.701 L/s y eleva el agua hasta el tanque de almacenamiento, venciendo una altura manométrica total de 32.35 mca. La conducción motriz se dimensionó en 1½" y la de impulsión en ½", esta última debido a su reducido caudal (0.027 L/s) pese a su longitud de 235 m. La presión de entrada al ariete fue de 2.59 mca, suficiente para su funcionamiento.

La presión disponible en la entrada de la parcela fue de 15.35 mca, frente a una presión requerida de 14.34 mca al inicio de la red secundaria, obteniéndose un margen positivo de 1.01 mca. Este resultado confirma la viabilidad hidráulica del sistema y que la carga del tanque garantiza la operación de los aspersores a su presión nominal, aunque el excedente de presión sugiere la incorporación de un elemento de regulación.

Para respaldar la selección de diámetros, se compararon las pérdidas por fricción obtenidas mediante Darcy-Weisbach y Hazen-Williams (Tabla D4, Apéndice D). Los resultados muestran que Darcy-Weisbach estima sistemáticamente pérdidas mayores en los tramos en régimen de transición, con diferencias de hasta 0.233 m.

7.7 Comportamiento hidráulico del sistema

Darcy-Weisbach estimó pérdidas mayores que Hazen-Williams (0.013–0.233 m) debido al régimen de transición del flujo ($Re = 2\,000$ – $18\,000$). Por ello, el dimensionamiento se realizó con Darcy-Weisbach, por ofrecer estimaciones más confiables, aunque ambos métodos mantuvieron márgenes de presión positivos.

Las pérdidas localizadas en la tubería secundaria estuvieron dominadas por la electroválvula ($K = 10$) y el contador ($K = 5$), que concentraron el 77 % del coeficiente acumulado ($\Sigma K = 19.45$). Debido a que estas pérdidas son proporcionales al cuadrado de la velocidad, la tubería secundaria se redimensionó de $\frac{1}{2}$ " a 1", reduciendo la velocidad de 2.25 a 0.56 m/s y disminuyendo significativamente su efecto.

La bomba de ariete resultó energéticamente autosuficiente, operando con un caudal motriz de 0.701 L/s, una eficiencia de 0.40, una relación $h/H = 10.33$ y una altura manométrica de 32.35 mca. El balance hidráulico presentó un margen de presión positivo de 1.01 mca en la entrada de la parcela. Además, el regulador de presión y el dispositivo de nivel constante garantizan la operación de los aspersores a su presión nominal (14.07 mca), favoreciendo la uniformidad de aplicación y reduciendo la deriva por viento (Naranjo Barrios, 2025).

7.8 Estimación de costos y viabilidad

El presupuesto se estructuró en cuatro categorías: equipos/herramientas, materiales, mano de obra de instalación y transporte. El detalle ítem por ítem con cantidades, precios unitarios y

proveedores se reporta en el Apéndice N. La inversión total estimada asciende a \$5,381,997 COP, según la Tabla 2: 0.26% herramientas, 88.96% materiales, 5.57% transporte, 5.21% mano de obra.

Los costos de operación son reducidos y comprenden el mantenimiento periódico del ariete, purgas periódicas de la red para mitigar sedimentación y reemplazo eventual de boquillas. Frente a una alternativa convencional con bomba eléctrica o de combustión, el sistema presenta inversión inicial moderadamente mayor por el costo del ariete, pero elimina rubros recurrentes de energía o combustible. Los resultados confirman la viabilidad económica para la unidad de 64 m² evaluada, con estructura de costos desplazada hacia inversión inicial y gasto recurrente bajo, condición que favorece la apropiación de la tecnología por el productor local. Para consultar otros modelos y precios de referencia de los materiales, véase la Tabla N1 del Apéndice N, también se presenta una tabla N2 del apéndice N, donde se muestra el APU del diseño de riego por aspersión.

Tabla 2. Resumen del presupuesto estimado de inversión del sistema de riego.

PROYECTO	DISEÑO AGRONÓMICO E HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR ASPERSIÓN PARA EL CULTIVO DE CEBOLLA DE RAMA EN EL PÁRAMO DE BERLÍN
CAPITULO	SISTEMA DE RIEGO POR ASPERSIÓN
ITEM	INSTALACIÓN SISTEMA DE RIEGO POR ASPERSIÓN
CONCEPTO	VALOR (COP)
EQUIPOS Y/O HERRAMIENTAS	\$ 14,007
MATERIALES DE OBRA	\$ 4,821,345
TRANSPORTE	\$ 300,000
MANO DE OBRA	\$ 280,145
Costo directo total	\$ 5,415,497

7.9 Previsiones del riego inteligente

Como propuesta, fuera del alcance de implementación del presente trabajo, el sistema diseñado contempla un esquema de automatización basado en el monitoreo de la humedad del suelo y el accionamiento automático de la electroválvula instalada en la red secundaria. De acuerdo con la literatura (Ferrarezi et al., 2015; Rivas Domínguez et al., 2022; Raheja et al., 2025), la

arquitectura integra sensores de humedad del suelo, un controlador electrónico (datalogger), una electroválvula y un sistema de alimentación fotovoltaica.

El funcionamiento del sistema se basa en la medición periódica de la humedad del suelo mediante sensores instalados en la zona radicular (15 y 30 cm de profundidad). Las lecturas son procesadas por el controlador, el cual las compara con el umbral de humedad establecido a partir de la fracción de agotamiento permisible adoptada para el diseño ($p = 0.30$). Cuando la humedad del suelo desciende por debajo de dicho umbral, el controlador activa la electroválvula e inicia el riego; una vez el suelo recupera una condición cercana a la capacidad de campo o se completa el tiempo de aplicación calculado ($t_a \approx 35$ min), la electroválvula se cierra automáticamente y el sistema reinicia el proceso de monitoreo.

Este esquema permite que el riego responda a las necesidades hídricas reales del cultivo, evitando aplicaciones basadas únicamente en intervalos fijos o en criterios empíricos del agricultor. Como resultado, se favorece un uso más eficiente del agua, se reducen las pérdidas por percolación y lixiviación de nutrientes, y se mantiene la humedad del suelo dentro del rango requerido para el cultivo.

Las especificaciones técnicas de los componentes propuestos para el sistema diseñado, así como otras alternativas empleadas en sistemas de riego inteligente reportados en la literatura, se presentan en el Apéndice O. Este apéndice incluye tanto los dispositivos seleccionados para la propuesta como componentes utilizados en investigaciones similares, particularmente la desarrollada por Rivas Domínguez et al. (2022), con el propósito de servir como referencia para futuras implementaciones del sistema

7.10 Limitaciones del estudio

El diseño presenta cinco limitaciones. Primero, el desnivel de alimentación del ariete ($H = 3 \text{ m}$) debe verificarse mediante un levantamiento topográfico de precisión por su influencia en la eficiencia del sistema. Segundo, el caudal de entrega reportado por el fabricante no especifica las condiciones de altura de alimentación, por lo que requiere verificación experimental tras la instalación. Tercero, el presupuesto se elaboró con cotizaciones vigentes durante el estudio y está sujeto a variaciones regionales y temporales, especialmente en el costo del ariete, el tanque y la mano de obra. Cuarto, la uniformidad del riego se evaluó a partir de parámetros teóricos del aspersor y del marco de riego, sin mediciones de campo, por lo que requiere validación experimental. Quinto, la automatización del riego (Sección 7.9) se plantea como una propuesta futura sustentada en la literatura, sin que su implementación, calibración y validación experimental hagan parte del alcance del presente trabajo.

8 Conclusiones

La caracterización edáfica reveló un suelo con baja agua utilizable (13.50 mm en los primeros 30 cm) y alta infiltración básica (30.85 cm/d), condición que determinó un esquema de riego con láminas reducidas (4.05 mm), un intervalo de aplicación de 2 días y un tiempo de riego de aproximadamente 35 minutos por evento. Estos parámetros constituyen la base del diseño agronómico y favorecen una aplicación eficiente del agua, reduciendo la sobreaplicación y la lixiviación documentada en la zona.

El diseño hidráulico resultó energéticamente consistente: la presión disponible superó la requerida agua abajo en cada tramo, con margen de cierre de 1.01 mca en la entrada de la parcela, y velocidades admisibles salvo en tramos de muy bajo caudal, donde se previeron purgas.

El empleo de la bomba de ariete hidráulico demostró ser una alternativa viable y sostenible para el contexto rural del páramo, al impulsar el agua sin consumo eléctrico utilizando el 21.6 % del caudal mínimo aforado, complementada con un tanque de 2 000 L que regula la operación y energiza la red de distribución.

En conjunto, los resultados confirman la viabilidad técnica del sistema y aportan una herramienta de diseño replicable para mejorar la eficiencia del uso del agua en sistemas productivos de alta montaña, contribuyendo a la sostenibilidad del recurso hídrico en un ecosistema estratégico.

9 Recomendaciones

Verificar mediante levantamiento topográfico de precisión el desnivel de alimentación del ariete hidráulico, por ser la variable más sensible para garantizar su correcto funcionamiento.

Realizar el aforo experimental del caudal de entrega del ariete una vez instalado, para validar los valores de catálogo bajo las condiciones reales de operación.

Implementar un programa de mantenimiento preventivo con purgas periódicas de la red mediante grifos en el fondo del tanque y un filtro de malla a la salida del tanque, para mitigar la sedimentación asociada a las bajas velocidades y proteger las boquillas de los aspersores.

Para las etapas de implementación y puesta en marcha del sistema, así como para futuras intervenciones relacionadas con la verificación de la instalación o el desarrollo de la propuesta de automatización del riego inteligente, se recomienda contar con personal técnico o mano de obra calificada, debido a que estas actividades requieren conocimientos especializados para garantizar el adecuado funcionamiento del sistema.

Complementar el diseño con monitoreo de la humedad del suelo y evaluación de la uniformidad de aplicación en operación, para ajustar la programación a las condiciones reales de

campo y validar experimentalmente los criterios adoptados. Asimismo, se recomienda contemplar, como medida preventiva ante posibles fenómenos de colmatación en la línea de impulsión, la implementación de un protocolo de limpieza periódica (flushing) de la tubería, especialmente en los periodos de menor caudal disponible.

Se recomienda, para una fase posterior de implementación o para estudios complementarios, realizar una campaña de aforo de la fuente en época de estiaje, con el fin de determinar el caudal mínimo real disponible bajo la condición hidrológica más crítica del año. Esta información permitiría contrastar el caudal asumido en el presente diseño con las condiciones reales de la fuente y, de ser necesario, ajustar los parámetros de operación del sistema.

De manera complementaria, se sugiere establecer un registro de aforos periódicos durante un ciclo hidrológico anual, que permita construir la curva de duración de caudales de la fuente y estimar el caudal garantizado (Q95). Con esta información sería posible recalcular con mayor precisión las velocidades reales de flujo en la tubería de impulsión y evaluar la pertinencia de modificar su diámetro, con el propósito de mitigar el riesgo de sedimentación identificado en el tramo ariete-tanque.

Referencias Bibliográficas

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., Fao, E., & Drenaje, R. Y. (2006). *Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*.
- Carrazón Alocén, J. (2007, October). *Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego*. <https://openknowledge.fao.org/items/dccbb12e-a0ff-4d21-a556-c3d1cfa9af26>
- Carsel, R. F., & Parrish, R. S. (1988). Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research*, 24(5), 755–769. <https://doi.org/10.1029/WR024I005P00755;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER>
- Celis Vargas, A. D. (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*. Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/11728>
- Chen, Z., Han, Y., Ning, K., Luo, C., Sheng, W., Wang, S., Fan, S., Wang, Y., & Wang, Q. (2019). Assessing the performance of different irrigation systems on lettuce (*Lactuca sativa* L.) in the greenhouse. *PLoS ONE*, 14(2), e0209329. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0209329>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2015). *Boletín mensual INSUMOS Y FACTORES ASOCIADOS A LA PRODUCCIÓN AGROPECUARIA*. <http://www.agenciadenoticias.unal.edu.co>

- Fernandez Gomez, R. (2010). *Manual de Riego para Agricultores*. 1–472.
<https://www.juntadeandalucia.es/>
- Ferrarezi, R. S., Dove, S. K., Iersel, M. W. van, Ferrarezi, R. S., Dove, S. K., & Iersel, M. W. van. (2015). An Automated System for Monitoring Soil Moisture and Controlling Irrigation Using Low-cost Open-source Microcontrollers. *HortTechnology*, 25(1), 110–118.
<https://doi.org/10.21273/HORTECH.25.1.110>
- Gardner, W. R. (1958). Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85(4), 228–232. <https://doi.org/10.1097/00010694-195804000-00006>
- Gómez Ríos, V. L. (2023). *Evaluación del comportamiento de la evapotranspiración en una unidad hidrográfica no intervenida de ecosistema de páramo*. Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/12227>
- Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., Vásquez, A., & Cerra, M. (2014). Los páramos andinos ¿Qué sabemos? *Tiempos de Crisis Sistémica*, 223–254.
<http://infoandina.org/infoandina/node/66057>
- 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 Noreña, J., Aguilar Aguilar, P. A., Cano, L. E., Tamayo, P. J., Franco, G., & Benjumea, F. (2016). *Modelo tecnológico para el cultivo de cebolla de rama Allium fistulosum*,

- en el departamento de Antioquia*. Corporación colombiana de investigación agropecuaria - AGROSAVIA. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/13755>
- Linares Ojeda, R. del M. (2012). *Proyecto de una explotación agrícola en el T.M. de Berja (Almería)*. <https://repositorio.ual.es/handle/10835/872>
- Monge Redondo, M. A. (2018). *Diseño Agronomico e Hidraulico de Riegos Agricolas a Presión*. <https://www.buscalibre.com.co/libro-diseno-agronomico-e-hidraulico-de-riegos-agricolas-a-presion/9788492928880/p/50411332>
- Naranjo Barrios, J. D. (2025). *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)*. Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/45369>
- Nile, A., Nile, S. H., Kim, D. H., Keum, Y. S., Seok, P. G., & Sharma, K. (2018). Valorization of onion solid waste and their flavonols for assessment of cytotoxicity, enzyme inhibitory and antioxidant activities. *Food and Chemical Toxicology*, 119, 281–289. <https://doi.org/10.1016/J.FCT.2018.02.056>
- Orrego, L. M. (2020, August 11). *Funcionamiento del Ariete Hidráulico*. <https://es.scribd.com/document/472044326/LOS-ARIETES-HIDRAULICOS-pdf>
- Oviedo-Ocaña, E. R., Hernández-Gómez, A., Dominguez, I., Alexis Parra-Orobio, B., Soto-Paz, J., & Sánchez, A. (2022). Evaluation of Co-Composting as an Alternative for the Use of Agricultural Waste of Spring Onions, Chicken Manure and Bio-Waste Produced in Moorland Ecosystems. *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 8720, 14(14), 8720. <https://doi.org/10.3390/SU14148720>

- Pérez, A. P. A., Acevedo, N. S., & Gualdrón, J. C. A. (2024). Cambios socioambientales en un ecosistema de páramo seco en el nororiente de Colombia. *Trabajo Social*, 26(2 | Jul.–Dic.), 134–162. <https://doi.org/10.15446/ts.v26n2.111916>
- Pinzón Ramírez, H., Clímaco Hio, J., Martínez Lemus, E. P., Quevedo Garzón, D. H., Murcia Contreras, G. A., Pedraza Rute, R. A., Martínez Nieto, P., Ortiz Piñeros, L. S., Montaña, C. E., Valderrama Navas, S. Y., Pinzón Perdomo, L. M., Rodríguez Valenzuela, J. C., & Sánchez León, G. D. (2012). Manual de la cebolla de rama. In *Manual de la cebolla de rama*. Corporación colombiana de investigación agropecuaria - AGROSAVIA. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/13255>
- Raheja, A., Sharda, R., Garg, S., Kaur, S., Das, S., & Choudhary, O. P. (2025). Designing and field calibration of low-cost microcontroller-based soil moisture sensor for subsurface drip-irrigation system. *Scientific Reports* 2025 15:1, 15(1), 35948-. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81288-z>
- 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*, 29(55), 83169–83190. <https://doi.org/10.1007/S11356-022-21709-6/TABLES/7>
- Rey-Romero, D. C., Méndez, Y. L., Daza-Torres, M. C., Domínguez, I., & Oviedo-Ocaña, E. R. (2025). Challenges and opportunities for the sustainable nitrogen management in a páramo agroecosystem: insights from local soil knowledge and farming practices. *Agroecology and Sustainable Food Systems*. <https://doi.org/10.1080/21683565.2025.2510357>

- Rivas Domínguez, M. R., Cano, S. A., Monterroza Alemán, J. N., & Escuintla Morán, J. J. (2022, February 18). *Sistema de riego inteligente con sensores y monitoreo automatizado de cultivo* - UNAB. <https://www.unab.edu.sv/books/sistema-de-riego-inteligente-con-sensores-y-monitoreo-automatizado-de-cultivo/>
- Romano, R. T., & Zhang, R. (2011). Anaerobic digestion of onion residuals using a mesophilic Anaerobic Phased Solids Digester. *Biomass and Bioenergy*, 35(10), 4174–4179. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2011.06.036>
- Sarmiento, C., independiente, investigador, 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, 122–145. <https://revistas.humboldt.org.co/index.php/BEP/article/view/480>
- Zhang, R. (1997). Determination of Soil Sorptivity and Hydraulic Conductivity from the Disk Infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 61(4), 1024–1030. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1997.03615995006100040005X;WGROU:STRING:PUBLICA>