

Prediseño de un pequeño embalse para suplir las necesidades hídricas de una unidad de cultivo de cebolla de rama (*Allium fistulosum*) ubicado en un predio de Berlín, Santander.

Edinson Pedrozo Ibarra y Jorge Andrés Pérez González

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

John Jairo Marquez Molina

PhD en Ciencias Agropecuarias - UBA

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2026

AGRADECIMIENTOS

Con profundo cariño y gratitud, dedicamos este trabajo a nuestros padres, amigos y parejas, quienes, con su apoyo incondicional, comprensión y paciencia nos acompañaron en cada etapa de este camino académico. Su confianza, palabras de aliento y presencia constante fueron el motor que nos permitió superar los momentos más difíciles y mantener viva la motivación para seguir adelante.

De manera muy especial, agradecemos al profesor John Jairo Márquez Molina, por su guía generosa, su compromiso y su pasión por la investigación, y por enseñarnos que investigar no es solo alcanzar un resultado, sino emprender un viaje continuo de aprendizaje, reflexión y construcción del conocimiento.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción 10

2. Objetivos 13

2.1 Objetivo general 13

2.2 Objetivos específicos 13

3. Marco teórico 14

4. Metodología 17

4.1 Área de Estudio y Notas de Datos 17

4.1.1 Diagrama de flujo metodológico 17

4.1.2 Localización y Caracterización Física 18

4.1.3 Notas de Datos y sus Limitaciones 20

4.2 Demanda Hídrica del Cultivo 21

4.2.1 Cálculo de la Evapotranspiración de Referencia (ET_o) y Precipitación Efectiva 21

4.2.2 Caracterización del Cultivo y Escenarios de Siembra 22

4.2.3 Cálculo de Necesidades Hídricas Brutas, Frecuencia y Tiempo de Riego 22

4.3 Delimitación y Caracterización de la unidad hidrológica de aporte 24

4.4 Oferta Hídrica de la Unidad Hidrológica 27

4.4.1	Cálculo del Número de Curva (NC), condiciones de humedad antecedente y la máxima retención de agua (S)	28
4.4.2	Condiciones de humedad antecedente del suelo	28
4.4.3	La máxima retención de agua	28
4.4.4	Cálculo de la Escorrentía Anual y Mensual	28
4.4.5	Método de Coutagne	29
4.4.6	Método de coeficiente de ajuste.....	29
4.5	Prediseño del pequeño embalse.....	31
4.5.1	Método del Algoritmo de Sucesión de Picos.....	31
4.5.2	Método de la Curva de Masa Inversa.....	31
4.5.3	Volumen del pequeño embalse	32
4.5.4	Volumen útil	32
4.5.5	Volumen muerto	33
4.5.6	Volumen mínimo de operación.....	33
4.5.7	Volumen total del pequeño embalse	33
4.5.8	Análisis y Selección de Alternativas para el pre-dimensionamiento de un pequeño embalse mediante Evaluación Multicriterio	34
4.5.9	Impacto de las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) en el prediseño del pequeño embalse	35

4.5.10	Cubierta vegetal de pasto pajonales de Calamagrostis effusa	35
4.5.11	Colchón reno.....	36
4.5.12	Trampa de sedimentos.....	36
4.5.13	Dren tipo pie	36
4.5.14	Aliviadero	36
4.6	Estimación de Costos del Prediseño y Recomendaciones	37
4.7	Consideración del Levantamiento Topográfico y Justificación.....	37
5.	Resultados	39
5.1	Parámetros morfométricos	39
5.2	Análisis hidrológico y demanda hídrica	40
5.2.1	Evapotranspiración del cultivo de referencia	40
5.2.2	Demanda hídrica de los cultivos	42
5.2.3	Revisión geotécnica del tipo de cobertura de la unidad hidrológica seleccionada	43
5.2.4	Caracterización del cultivo, coeficientes de cultivo (Kc) y necesidades netas de riego	44
5.2.5	Determinación de la Dosis Neta de Riego y Frecuencia.....	45
5.3	Determinación de la oferta hídrica	47
5.3.1	Determinación del número de curva (NC) y de la máxima retención Posible (S)	47
5.3.2	Determinación del escurrimiento anual del sector hidrológico (método de Coutagne).....	48

5.3.3	Determinación del escurrimiento mensual del sector hidrológico mediante el método del coeficiente de ajuste (K)	49
5.4	Propuesta de diseño para la capacidad de un pequeño embalse.....	52
5.4.1	Método del algoritmo de sucesión de picos o pico se cuente.....	52
5.4.2	Método de la curva de masa a la inversa.....	52
5.4.3	Balance hídrico en el pequeño embalse	52
5.5	Diseño preliminar del pequeño embalse y obras asociadas	54
5.5.1	Tipo de Material y Configuración del Dique.....	54
5.5.2	Diseño de la trampa de sedimentos.....	55
5.5.3	Análisis de alternativas para el pre dimensionamiento del pequeño embalse.....	55
5.5.4	Soluciones para el control de erosión y estabilidad	61
5.5.5	Impacto de las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) en el prediseño del pequeño embalse	65
6.	Discusiones	67
7.	Conclusiones	69
8.	Recomendaciones	71
9.	Referencias.....	73

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 *Parámetros morfométricos Parámetros morfométricos*..... 39

Tabla 2 *Datos climatológicos Datos climatológicos* 40

Tabla 3 *Evapotranspiración de referencia (ETo) – Promedios mensuales multianuales estimados con CropWat Evapotranspiración de referencia (ETo) – Promedios mensuales multianuales estimados con CropWat* 41

Tabla 4 *Precipitación efectiva – Totales mensuales multianuales estimados con CropWat Precipitación efectiva – Totales mensuales multianuales estimados con CropWat* 42

Tabla 5 *Coefficientes de ajuste para condiciones de Humedad Antecedente (AMC I, II y II)*..... 48

Tabla 6 *Determinación mensual del coeficiente K en función de la precipitación media mensual multi anual y el parámetro S*..... 50

Tabla 7 *Escorrentía mensual generada en lámina de agua para cada mes, ajustada con el coeficiente K = 0.83* 51

Tabla 8 *Resumen de todos los parámetros considerados y resultados obtenidos*..... 54

Tabla 9 *Matriz de evaluación* 58

Tabla 10 *Costo del proyecto* 65

LISTA DE ILUSTRACIONES

Figura 1 <i>Diagrama de flujo</i>	17
Figura 2 <i>Ubicación geográfica de la unidad hidrográfica</i>	18
Figura 3 <i>División parcelaria del cultivo de cebolla de rama</i>	20
Figura 4 <i>Etapas fenológicas de los cultivos</i>	23
Figura 5 <i>Curvas de nivel y modelo digital de elevaciones</i>	25
Figura 6 <i>Vista del terreno en primera persona</i>	26
Figura 7 <i>Delimitación de las unidades hidrológicas en QGIS</i>	27
Figura 8 <i>Flujograma de la distribución mensual de los volúmenes de escorrentía</i>	30
Figura 9 <i>Distribución de coberturas del suelo en la cuenca hidrográfica</i>	43
Figura 10 <i>Comportamiento típico del coeficiente de cultivo (Kc) a lo largo del ciclo de la cebolla de rama</i>	44
Figura 11 <i>Demanda neta mensual máxima seleccionada por mes del año</i>	45
Figura 12 <i>Intervalo máximo entre riegos por mes</i>	46
Figura 13 <i>Balance hídrico mensual entre dosis bruta de riego, precipitación efectiva Balance hídrico mensual entre dosis bruta de riego, precipitación efectiva y ETc</i>	47
Figura 14 <i>escorrentía generada en lámina de agua y volumen anual para cada año</i>	49
Figura 15 <i>Evaporación del Embalse</i>	53
Figura 16 <i>Dimensiones de la trampa de sedimentos y su vista tridimensional</i>	55

Figura 17 Alternativas y sección trapezoidal: alternativa 1 (rojo), alternativa 2 (morado) y alternativa 3 – diseño óptimo (azul) 56

Figura 18 Vista en planta del embalse elegido 60

Figura 19 Vista tridimensional del embalse elegido..... 61

Figura 20 Dimensiones del embalse 61

Figura 21 Dimensiones del dren y vista tridimensional..... 62

Figura 22 Curva IDF método simplificado 63

Figura 23 Dimensiones del aliviadero y vista tridimensional 64

LISTA DE APÉNDICES

Apéndice A. Ecuaciones

Apéndice B. Parámetros de demanda de riego

Apéndice C. Parámetros de oferta de agua

Apéndice D. Diseño del embalse

Apéndice E. Tablas resumen de la investigación

Apéndice F. Formato APU para cada una de las actividades

Apéndice G. Cartas de respuesta a las observaciones solicitadas por los calificadores

RESUMEN

Título: Prediseño de un pequeño embalse para suplir las necesidades hídricas de una unidad de cultivo de cebolla de rama (*Allium fistulosum*) ubicado en un predio de Berlín, Santander.

Autor: Edinson Pedrozo Ibarra, Jorge Andrés Pérez Gonzáles

Palabras Clave: Páramo, embalse agrícola, cebolla de rama, demanda hídrica, Soluciones Basadas en la Naturaleza, CROPWAT, sostenibilidad

Descripción:

El páramo de Berlín, municipio de Tona (Santander, Colombia), enfrenta una creciente presión hídrica derivada del cultivo de cebolla de rama (*Allium fistulosum*), actividad que demanda extracción directa y no planificada de fuentes naturales. Ante esta problemática, el presente trabajo desarrolla el prediseño de un pequeño embalse agrícola para un predio de 12.406,8 m², integrando criterios de sostenibilidad y Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN). La demanda hídrica se determinó mediante el software CROPWAT 8.0 (método FAO Penman-Monteith) y cuatro escenarios de siembra escalonada, mientras que la oferta se estimó a partir de series históricas de 30 años con los métodos de Coutagne y coeficiente de ajuste. La capacidad del pequeño embalse se calculó aplicando el método de la curva de masa inversa y el algoritmo de sucesión de picos. Los resultados arrojaron un volumen total de 4.601,65 m³, con volumen útil de 4.527,4 m³, suficiente para atender una superficie cultivada de 55.873 m². El dique, de sección trapezoidal con altura de 2,5 m y taludes 2:1, incorpora dren tipo pie, trampa de sedimentos, colchón reno y revegetación con *Calamagrostis effusa*. La inversión estimada asciende a \$323.233.311 COP, con una relación beneficio-costos proyectada entre 1,3 y 2,5, coherente con lo reportado en literatura especializada. El diseño cumple con la Ley 1930 de 2018 y demuestra la viabilidad técnica, ambiental y económica de una solución híbrida que reduce la presión sobre las fuentes hídricas del ecosistema paramuno.

Trabajo de Grado

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: John Jairo Marquez Molina. PhD en Ciencias Agropecuarias - UBA

ABSTRACT

Title: Pre-design of a small reservoir to supply the water needs of a branch onion (*Allium fistulosum*) crop unit located on a property in Berlín, Santander.

Author: Edinson Pedrozo Ibarra, Jorge Andrés Pérez Gonzáles

Keywords: Páramo, agricultural reservoir, branch onion, water demand, Nature-based Solutions, CROPWAT, sustainability

Description:

The Berlin páramo, located in the municipality of Tona (Santander, Colombia), faces growing water pressure from the cultivation of branch onion (*Allium fistulosum*), an activity that requires direct and unplanned extraction from natural water sources. In response to this problem, the present work develops the pre-design of a small agricultural reservoir for a 12,406.8 m² property, integrating sustainability criteria and Nature-based Solutions (NbS). Water demand was determined using CROPWAT 8.0 software (FAO Penman-Monteith method) and four staggered planting scenarios, while water supply was estimated from 30-year historical series using the Coutagne method and adjustment coefficient. The reservoir capacity was calculated by applying the inverse mass curve method and the peak succession algorithm. Results yielded a total volume of 4,601.65 m³, with a useful volume of 4,527.4 m³, sufficient to serve a cultivated area of 55,873 m². The dam, with a trapezoidal cross-section 2.5 m in height and 2:1 slopes, incorporates a toe drain, sediment trap, reno mattress, and revegetation with *Calamagrostis effusa*. The estimated investment amounts to \$323,233,311 COP, with a projected benefit-cost ratio between 1.3 and 2.5, consistent with values reported in specialized literature. The design complies with Law 1930 of 2018 and demonstrates the technical, environmental, and economic feasibility of a hybrid solution that reduces pressure on the water sources of the páramo ecosystem.

Undergraduate Thesis

Faculty of Physicomechanical Engineering, School of Civil Engineering. Advisor: John Jairo Marquez Molina. PhD in Agricultural Sciences - UBA.

1. Introducción

Los páramos son ecosistemas estratégicos de alta montaña que desempeñan un papel fundamental en la regulación hídrica, al actuar como sistemas naturales de almacenamiento y liberación gradual del agua hacia las zonas bajas, lo que garantiza la disponibilidad del recurso y la estabilidad de los ciclos hidrológicos (Restrepo, 2008). Debido a estas funciones, constituyen un componente clave para la seguridad hídrica y la sostenibilidad ambiental.

Sin embargo, estos ecosistemas enfrentan crecientes presiones derivadas de actividades antrópicas, particularmente de la expansión agrícola y del uso intensivo del recurso hídrico. Los cambios en el uso del suelo y la captación directa de agua sin planificación técnica afectan la integridad ecológica de los páramos y generan alteraciones en la disponibilidad y dinámica del recurso hídrico.

En el páramo de Berlín, esta problemática se acentúa debido al predominio del cultivo de cebolla de rama (*Allium fistulosum*), una actividad agrícola con alta dependencia de la disponibilidad de agua y de las condiciones climáticas. Y especialmente por tratarse de un cultivo que presenta una elevada demanda hídrica (Galindo, 2024), lo que ha ocasionado una presión significativa sobre Notas naturales como quebradas y manantiales, afectando el caudal ecológico y el equilibrio hidrológico de la zona.

Diversos estudios han evidenciado que la extracción intensiva de agua para riego, sumada a prácticas agrícolas no planificadas, genera impactos asociados tanto a la cantidad como a la calidad del recurso hídrico (Naranjo, 2025). Frente a este escenario, los pequeños embalses se han propuesto como una alternativa técnica para captar y almacenar agua lluvia y esorrentía,

reduciendo la extracción directa de Notas naturales y mitigando el riesgo de escasez hídrica e impactos ambientales (Owusu, 2022).

En Colombia, esta infraestructura ha sido considerada una estrategia para mejorar la seguridad hídrica rural, siempre que su diseño incorpore criterios ecosistémicos rigurosos y se ajuste a la normativa vigente (Vásquez, 2012); (MinAmbiente, 2018). Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo el prediseño de un pequeño embalse en el páramo de Berlín, a partir del análisis de la oferta y demanda hídrica asociada al cultivo de cebolla de rama, evaluando las condiciones del terreno y los posibles impactos ambientales, con el fin de mejorar el balance entre la productividad agrícola y la conservación del ecosistema de páramo.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Pre-diseñar un pequeño embalse agrícola para satisfacer las necesidades hídricas de una unidad productiva de cultivo de cebolla de rama (*Allium fistulosum*) en un predio ubicado en Berlín, Santander, integrando criterios de sostenibilidad y eficiencia en el uso del recurso hídrico.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las condiciones topográficas, geológicas, hidrológicas y climáticas del área de estudio para identificar los parámetros técnicos necesarios en el prediseño del pequeño embalse agrícola.

- Determinar la demanda hídrica del cultivo de cebolla de rama en el predio y estimar la capacidad de almacenamiento requerida para garantizar un suministro eficiente de agua durante todo el ciclo agrícola.
- Diseñar una propuesta técnica preliminar del pequeño embalse agrícola, incorporando principios de sostenibilidad y soluciones basadas en la naturaleza (SbN) para reducir el impacto ambiental y optimizar el uso del recurso hídrico.

3. Marco teórico

Los ecosistemas de páramo corresponden a sistemas de alta montaña con una elevada capacidad de regulación hídrica, determinada por sus condiciones climáticas, edáficas y de cobertura vegetal. Desde un enfoque ecohidrológico, estos ecosistemas actúan como reguladores naturales del ciclo hidrológico, al favorecer la infiltración, el almacenamiento temporal del agua en suelos de alta porosidad y su liberación gradual hacia las corrientes superficiales y subterráneas aguas abajo (Restrepo, 2008). Esta función convierte al recurso hídrico en un servicio ecosistémico esencial y en un elemento estructural del funcionamiento ambiental del páramo.

La demanda hídrica agrícola constituye una de las principales presiones sobre estos ecosistemas. Conceptualmente, se define como el volumen de agua requerido por un cultivo para satisfacer sus procesos fisiológicos, considerando factores climáticos, características del suelo y prácticas de manejo. En los cultivos hortícolas, como la cebolla de rama (*Allium fistulosum*), las necesidades hídricas son elevadas debido a su ciclo productivo continuo y a su sensibilidad al

déficit hídrico, lo que incrementa la dependencia de Notas naturales de agua superficiales y subterráneas (Galindo, 2024).

En este contexto, el balance hídrico se constituye en una herramienta teórica fundamental para la planificación y gestión del recurso hídrico. Desde el punto de vista hidrológico, el balance hídrico permite cuantificar las entradas al sistema, principalmente la precipitación efectiva, las salidas asociadas a la evapotranspiración y la escorrentía, así como las variaciones del almacenamiento. Metodologías como la curva de masa inversa y el algoritmo de sucesión de picos se emplean para identificar periodos de déficit y excedente hídrico, permitiendo estimar el volumen de almacenamiento requerido para garantizar la continuidad del suministro durante épocas secas (Peralta, 2019).

A partir de este enfoque, los pequeños embalses se definen como estructuras hidráulicas de regulación destinadas a la captación y almacenamiento de agua lluvia y escorrentía superficial, con el objetivo de atender demandas agrícolas sin incrementar la extracción directa de nacimientos y quebradas. Su dimensionamiento incorpora parámetros como la evapotranspiración de referencia, comúnmente estimada mediante el método FAO Penman–Monteith; la precipitación efectiva, calculada mediante el método USDA-SCS; y la escorrentía, estimada a partir de métodos empíricos como Coutagne y el coeficiente de ajuste. Adicionalmente, el diseño técnico considera elementos complementarios —aliviaderos, sistemas de drenaje, trampas de sedimentos y estructuras de control de erosión— que garantizan la estabilidad hidráulica y estructural del pequeño embalse y prolongan su vida útil (Owusu, 2022).

Desde un enfoque de sostenibilidad ambiental, la implementación de pequeños embalses en ecosistemas de páramo debe articularse con el marco conceptual de las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN). Estas se definen como acciones que protegen, gestionan o restauran ecosistemas naturales o modificados de manera sostenible para enfrentar desafíos sociales, como la seguridad hídrica, generando beneficios simultáneos para el bienestar humano y la biodiversidad. En ecosistemas estratégicos como los páramos, las SbN adquieren especial relevancia al permitir intervenciones que refuercen los procesos naturales de regulación hídrica sin comprometer la funcionalidad ecológica del sistema.

En este sentido, las infraestructuras de almacenamiento hídrico de pequeña escala, cuando incorporan criterios ecosistémicos y minimizan la alteración del entorno, pueden considerarse soluciones híbridas que integran infraestructura gris con procesos naturales. La incorporación de coberturas vegetales nativas, como el pasto pajonal (*Calamagrostis effusa*), así como el diseño de obras orientadas al control de la erosión y la retención de sedimentos, favorece la integración funcional de este tipo de infraestructuras al ecosistema. Este enfoque resulta coherente con lo establecido en la Ley 1930 de 2018, que promueve intervenciones en páramos basadas en criterios ecosistémicos y de sostenibilidad (MinAmbiente, 2018).

4. Metodología

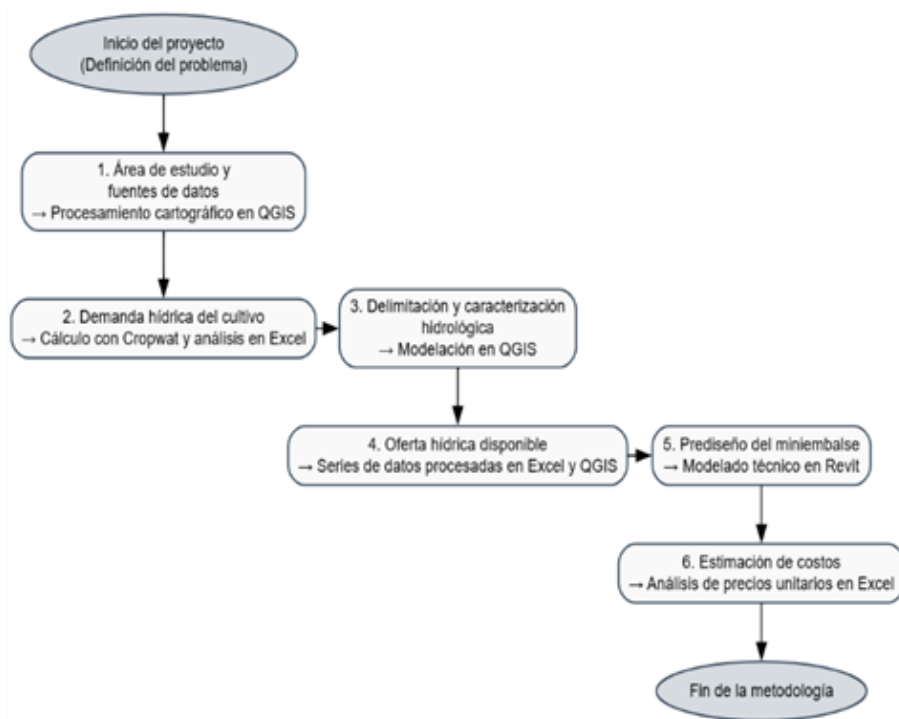
4.1 Área de Estudio y Notas de Datos

4.1.1 Diagrama de flujo metodológico

La Figura 1 presenta el diagrama de flujo metodológico que resume las principales fases del estudio, desde la definición del problema y el análisis del área de estudio hasta la estimación de la oferta hídrica, el prediseño del pequeño embalse y la evaluación de costos, permitiendo visualizar de forma clara la secuencia de actividades desarrolladas en la investigación.

Figura 1

Diagrama de flujo



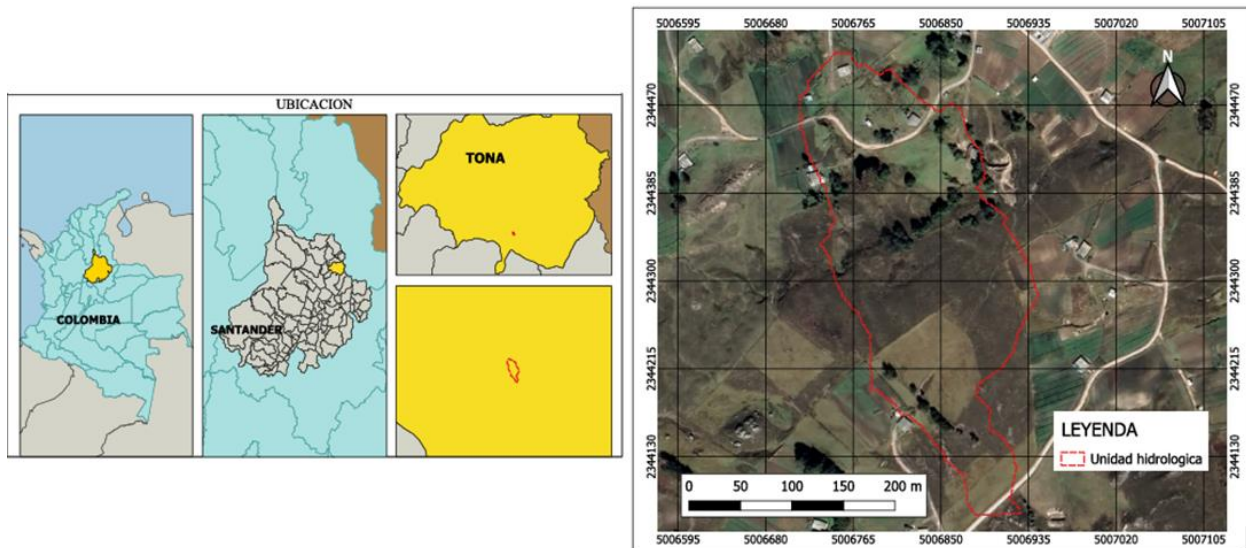
Nota: Elaboración propia

4.1.2 Localización y Caracterización Física

El área del predio donde se realizó el prediseño del pequeño embalse corresponde a 12.406,8 m², ubicado en el páramo de Berlín, municipio de Tona, Santander, Colombia, georreferenciado en las coordenadas 7.118337°, -72.939144°. En la zona se identificaron la estación pluviométrica Picacho (IDEAM: 23190300) y la estación climática Berlín (IDEAM: 37015020), cuyos registros pluviométricos y climáticos abarcan aproximadamente 30 años (1991–2020) con escala mensual multianual, información fundamental para el análisis hidrológico del área. La Figura 2 muestra la localización de la unidad hidrológica del estudio.

Figura 2

Ubicación geográfica de la unidad hidrográfica



Nota: Elaboración propia a partir del DANE y PERU

La Figura 3 muestra la distribución del área de estudio correspondiente al cultivo de cebolla de rama (*Allium fistulosum*) y la ubicación del sitio seleccionado para el prediseño del pequeño embalse. La elección de este emplazamiento respondió a criterios técnicos, productivos e hidrológicos. En primer lugar, en la zona ya se encuentra construido un pequeño embalse, el cual se pretende adecuar y optimizar a partir de los

criterios técnicos derivados del presente estudio, lo que permite aprovechar infraestructura existente y minimizar nuevas intervenciones sobre el territorio. En segundo lugar, el sitio proyectado se localiza dentro del establecimiento del productor y en cercanía directa a las parcelas donde se planea aplicar el riego, lo que favorece la eficiencia en la distribución del agua y reduce pérdidas asociadas al transporte. Finalmente, el área corresponde a un sector de drenaje de la unidad hidrológica local, donde confluyen escurrimientos de exceso de precipitación durante las épocas lluviosas, facilitando así la captación y el almacenamiento del agua proveniente de la precipitación y de flujos subsuperficiales, tal como ha sido evidenciado por Naranjo (2025).

Las áreas de cultivo se determinaron mediante el uso del software QGIS, empleando herramientas de medición y análisis espacial para la digitalización de las parcelas destinadas al cultivo de cebolla de rama. A partir de este procedimiento se estableció que las unidades de cultivo presentan superficies entre 150 m² y 200 m², según el manejo implementado por el productor. Esta información fue complementada con los datos recopilados en el estudio de Naranjo (2025), en el cual se aplicó una encuesta al agricultor que permitió identificar la organización del terreno, los tamaños de las parcelas y los periodos de siembra y cosecha a lo largo del año. La integración de la información espacial con el levantamiento de datos primarios garantizó una adecuada caracterización del uso del suelo y de las dinámicas productivas del sistema agrícola evaluado.

Posteriormente, las parcelas se clasificaron según escenarios de siembra anual, representados mediante códigos de color: azul claro (enero–diciembre), azul oscuro (febrero–enero), verde claro (marzo–febrero) y verde oscuro (abril–marzo), lo que permitió identificar espacialmente la distribución temporal de la siembra dentro del predio.

Figura 3

División parcelaria del cultivo de cebolla de rama



Nota: Elaboración propia en QGIS

4.1.3 Notas de Datos y sus Limitaciones

Aunque los parámetros utilizados corresponden a la mejor información disponible para el páramo de Berlín, ninguno fue obtenido mediante mediciones directas en el predio de estudio.

Los datos climáticos, como temperatura, humedad relativa y velocidad del viento fueron procesados por Gómez (2022) a partir de registros del IDEAM de la estación Berlín, permitiendo una aproximación técnica adecuada para el prediseño del pequeño embalse. La precipitación histórica se obtuvo de series temporales de la estación Picacho; sin embargo, la ausencia de una estación pluviométrica en el predio introduce cierto grado de incertidumbre debido a la variabilidad espacial propia de zonas de alta montaña.

Las características agronómicas del suelo, como agua utilizable, densidad aparente y punto de marchitez permanente se adoptaron del estudio de Naranjo (2025), complementadas con el Manual de Recomendaciones Técnicas de Galindo (2024) para la profundidad efectiva de raíces y

con valores de infiltración reportados por Rojas (1996), lo que permitió estimar las necesidades hídricas y periodos críticos del cultivo.

Finalmente, las propiedades del suelo se basaron en la caracterización de Arenas (2005), estudio seleccionado por abarcar de forma integral los suelos de la región de interés y por constituir una tipología general y representativa a escala regional. De acuerdo con esta referencia, el área de estudio corresponde a un suelo franco arcilloso arenoso, caracterizado por una permeabilidad moderada y una alta capacidad de retención de humedad, condiciones relevantes para el análisis hidrológico y el prediseño del pequeño embalse.

4.2 Demanda Hídrica del Cultivo

4.2.1 Cálculo de la Evapotranspiración de Referencia (ET_o) y Precipitación Efectiva

La evapotranspiración de referencia (ET_o) se estimó mediante el software CROPWAT 8.0 de la FAO, utilizando el método Penman–Monteith (Doorenbos y Pruitt, 1992), reconocido como estándar internacional, el cual integra variables meteorológicas como temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y presión de vapor.

La precipitación efectiva (Pe) se calculó mediante el método USDA-SCS (Carrazón, 2007), empleando como variable de entrada la precipitación mensual proveniente de las series históricas del IDEAM correspondientes a la estación Picacho (código: 23190300).

Para el cálculo de los requerimientos de riego se utilizaron registros mensuales superiores a 10 años, expresados en mm/mes, considerando una probabilidad de ocurrencia del 75% (Cruz, 2015).

4.2.2 Caracterización del Cultivo y Escenarios de Siembra

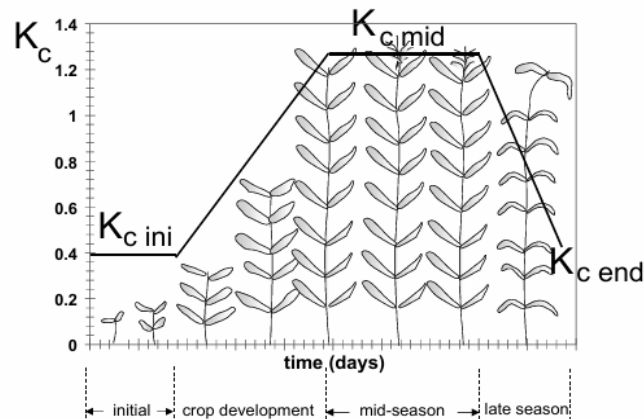
La cebolla de rama tiene ciclo semipermanente: primera cosecha a los cinco o seis meses y rebrotes cada cuatro meses sin replantación (Chaparro, 2016), con producción continua gracias a su adaptabilidad estacional y altitudinal (Naranjo, 2025). Para el prediseño del pequeño embalse se definieron cuatro escenarios de siembra escalonada (enero, febrero, marzo y abril), cada uno de doce meses, simulando tres ciclos productivos consecutivos. Esto permitió representar la demanda hídrica mensual de forma continua e identificar los períodos de mayor requerimiento de riego, justificando el enfoque multi-escenario para estimar la necesidad neta del predio (Chaparro, 2016) (Carrazón, 2007).

4.2.3 Cálculo de Necesidades Hídricas Brutas, Frecuencia y Tiempo de Riego

Para estimar la dosis neta, la frecuencia y el tiempo de riego del cultivo de cebolla de rama, se aplicó una metodología agronómica e hidrológica (Carrazón, 2007), determinando la necesidad neta de riego a partir de la evapotranspiración de referencia (ET_o) y el coeficiente de cultivo (K_c) según cada etapa fenológica (Figura 4) (Doorenbos y Pruitt, 1992).

Figura 4

Etapas fenológicas de los cultivos



Nota: (Allen, 1998)

Los valores del coeficiente de cultivo (K_c) se tomaron de la literatura técnica (Tabla 16, Apéndice E) y se ajustaron a la duración real del cultivo mediante interpolación lineal (Ecuación 2, Apéndice A), de acuerdo con lo propuesto por Carrazón (2007). A partir de estos valores se calculó la evapotranspiración del cultivo (ET_c) para cada escenario evaluado (Allen, 1998). La necesidad neta mensual (N_n) se obtuvo descontando la precipitación efectiva de la ET_c (Ecuación 4, Apéndice A), seleccionando posteriormente el valor máximo entre los cuatro escenarios con el fin de construir la serie crítica de diseño (Doorenbos y Pruitt, 1992).

Con base en los parámetros edáficos definidos por Naranjo (2025) y Arenas (2005), y considerando un déficit permisible del 50 %, se calcularon la dosis neta de riego (D_n) (Ecuación 5), el intervalo máximo entre riegos, ajustado a días enteros (Ecuación 6, Apéndice A). A continuación, se estableció la dosis neta ajustada ($D_{n\ aj}$), la dosis neta de riego (ecuación 7, Apéndice A) (Carrazón, 2007) Este ajuste se realizó debido a que el resultado obtenido para el máximo intervalo entre riegos presentaba valores decimales, y además debía guardar relación con

el regante presente, por esa razón el proceso consistió en aproximar dicho intervalo a un número entero y procurando que coincidiera con el intervalo típico de riego empleado en la zona (Carrazón, 2007), se recalculo la dosis neta de agua que se debe aplicar en cada riego, y la dosis bruta (Db) (Ecuación 8). Para esta última se asumió una eficiencia del sistema de riego por aspersión del 75 % (Cruz, 2015); (Quiñones, 2022). El tiempo de aplicación se estimó mediante la Ecuación 9 (Apéndice A), ya que resulta fundamental para la operación del sistema de riego, porque permite establecer el tiempo requerido de funcionamiento de cada aspersor para aplicar la lámina bruta de riego proveniente de la Nota de almacenamiento teniendo en cuenta la infiltración del suelo, el factor de pendiente y la dosis bruta (Nuñez, 2015); (Carrazón, 2007). Finalmente, las necesidades brutas (Ecuación 10, Apéndice A) permitieron cuantificar el volumen de agua a almacenar, descontando las pérdidas por evaporación e infiltración. El detalle de los cálculos se presenta en el Apéndice B.

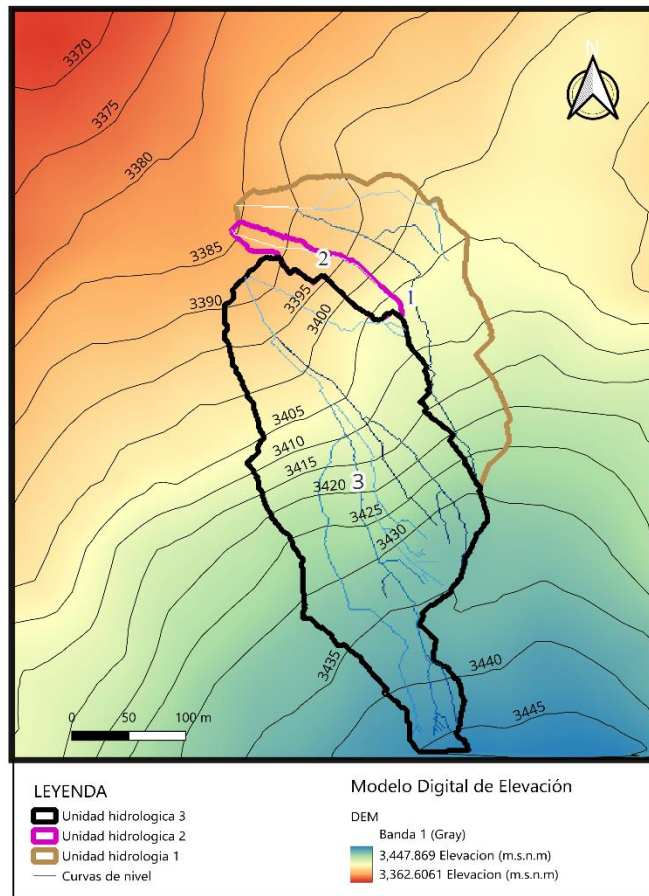
4.3 Delimitación y Caracterización de la unidad hidrológica de aporte

La caracterización de la unidad hidrográfica —superficie de aporte del pequeño embalse por escorrentía— se realizó con QGIS (QGIS Project, 2022) e información geoespacial oficial (DANE, 2025). La unidad comprende mosaico de pastos y cultivos y herbazal denso no arbolado (MinAmbiente, 2004). En la Figura 5 se presentan las curvas de nivel y el modelo digital de elevaciones (DEM) del sector, se obtuvieron con Google Earth y se procesaron mediante

interpolación TIN en QGIS. La delimitación del predio y la red de drenaje se definió siguiendo curvas de nivel y el flujo del cauce principal (Figura 6 y 7).

Figura 5

Curvas de nivel y modelo digital de elevaciones



Nota: Elaboración propia

Figura 6

Vista del terreno en primera persona

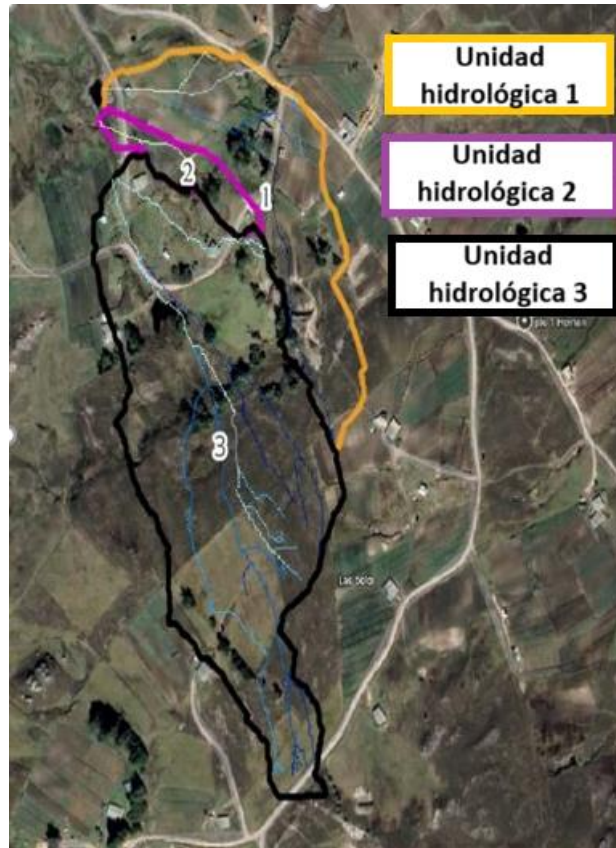


Nota: Elaboración propia

Para la delimitación de la unidad hidrológica del área de estudio, se identificaron inicialmente tres microcuencas potenciales. Posteriormente, se analizó la morfología del terreno, considerando la topografía y las barreras naturales que influyen en la conducción del flujo superficial hacia el sitio de almacenamiento. Con base en esta evaluación, se seleccionó la alternativa con mejores condiciones hidráulicas para el escurrimiento natural hacia el punto de captación (Figura 7).

Figura 7

Delimitación de las unidades hidrológicas en QGIS



Nota: Elaboración propia

4.4 Oferta Hídrica de la Unidad Hidrológica

Se consolidaron los datos históricos de precipitación anual, el número medio de días de lluvia por mes y la temperatura media anual de la cuenca. La información detallada de estos registros se presenta en el Apéndice C.1.

4.4.1 Cálculo del Número de Curva (NC), condiciones de humedad antecedente y la máxima retención de agua (S)

Tras distribuir proporcionalmente las coberturas del suelo —herbazal denso de tierra firme no arbolado y mosaico de pastos y cultivos— se determinó el número de curva para cada una según el grupo hidrológico del suelo. Este parámetro permitió caracterizar el potencial de escorrentía de la unidad hidrográfica (Díaz, 2017). Posteriormente, mediante la ecuación 11, se calculó el número de curva (NC) ponderado de la unidad hidrológica (Dal-Re, 2003) (Apéndice A).

4.4.2 Condiciones de humedad antecedente del suelo

Las condiciones antecedentes de humedad del suelo se evaluaron a partir del número de curva en condiciones medias (NC II). Con base en este valor, se estimaron los números de curva en condiciones secas (NC I) y húmedas (NC III) mediante las ecuaciones correspondientes (Dal-Re, 2003) (Apéndice A).

4.4.3 La máxima retención de agua

La máxima retención de agua en el suelo (S) se calculó mediante la ecuación 14 (Apéndice A), utilizando el número de curva correspondiente a las condiciones de humedad seca (NC I), media (NC II) y húmeda (NC III). Posteriormente, se determinó la escorrentía directa (Q) mediante la ecuación 15, estimando el caudal generado por una precipitación determinada en la unidad hidrológica de estudio (Dal-Re, 2003).

4.4.4 Cálculo de la Escorrentía Anual y Mensual

La escorrentía se estimó con datos pluviométricos de la estación Picacho (código 23190300): precipitaciones mensuales, anuales y número de días de lluvia (Dal-Re, 2003). Ante la

ausencia de afloramientos, la escorrentía directa anual se calculó con el Método de Coutagne (Remenieras, 1974), a partir de la precipitación y temperatura media anual (Annette, 2011), y su distribución mensual se obtuvo mediante el método de coeficientes de ajuste (Dal-Re, 2003), considerando la variación estacional. La combinación de ambos métodos permitió estimar de forma práctica los volúmenes de escorrentía requeridos para el prediseño.

4.4.5 Método de Coutagne

Con la serie histórica de 30 años se determinó la escorrentía directa anual (Q) en lámina de agua a partir de la precipitación anual (P) y la temperatura media anual (T_a) (Remenieras, 1974) (Rodríguez, 2016). La precipitación neta se calculó descontando la infiltración, estimada en el 90% de la precipitación anual (tabla 12, Apéndice E) (ecuaciones 17 y 18, Apéndice A). El coeficiente λ , que relaciona la temperatura con la capacidad de generar escorrentía, se definió según la ecuación 19 (Apéndice A). El método se aplicó únicamente a los años que cumplieron los rangos de precipitación establecidos (ecuación 18, Apéndice A), excluyendo años extraordinarios, y la escorrentía Q se obtuvo mediante la ecuación 20 (Apéndice A) (Dal-Re, 2003).

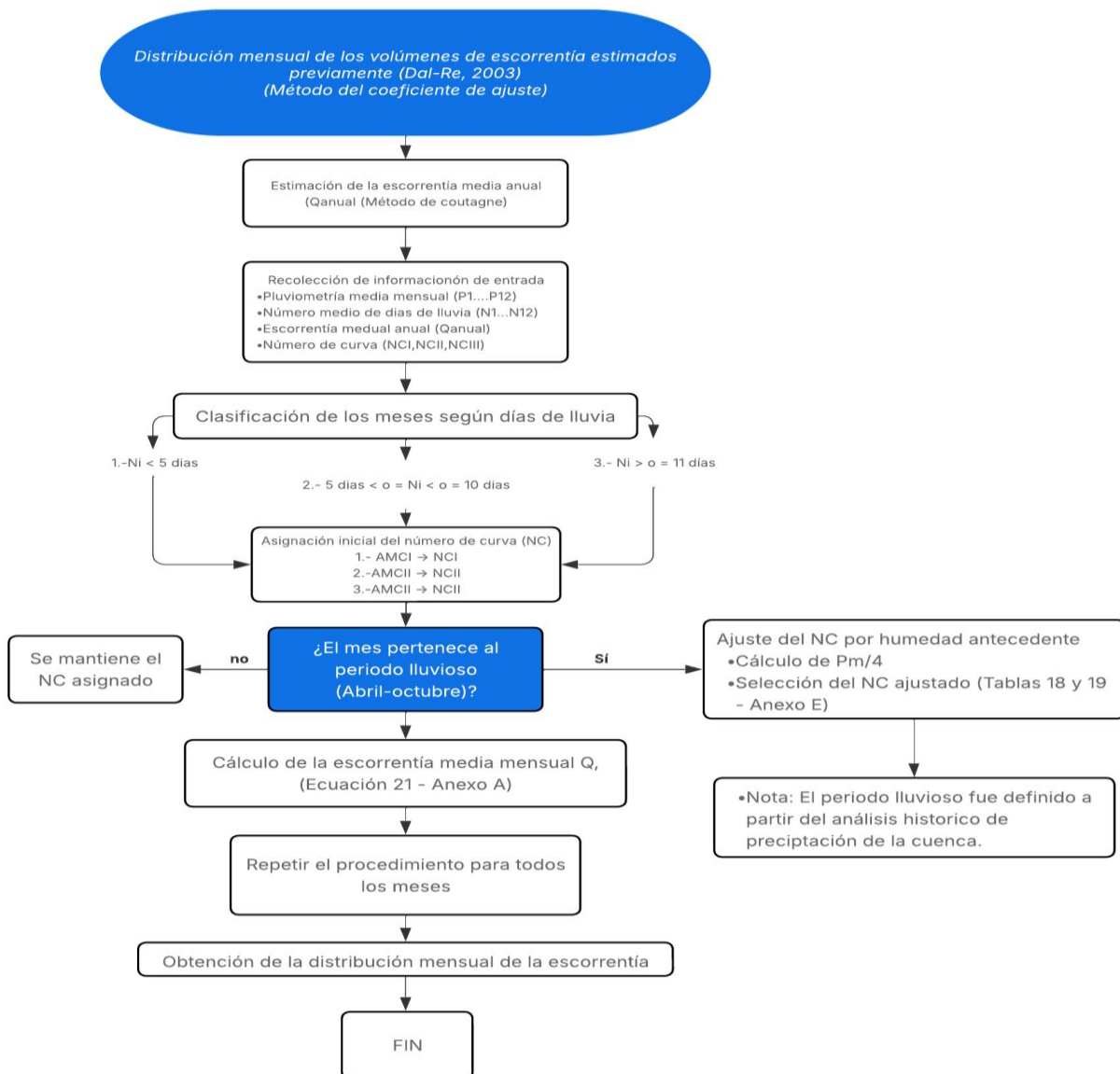
4.4.6 Método de coeficiente de ajuste

Para distribuir la escorrentía anual de Coutagne en valores mensuales, se aplicó el Método del Coeficiente de Ajuste (Dal-Re, 2003), apropiado para las condiciones geomorfológicas y el bajo flujo base de la cuenca. Como entradas se utilizaron la precipitación media mensual, el número de días de lluvia, la escorrentía anual y los números de curva en condiciones secas, medias y húmedas. Los meses se clasificaron según humedad antecedente, asignando el NC mensual correspondiente y ajustándolo durante el período húmedo (octubre–abril) conforme a las Tablas 13

y 14 (Apéndice E). La escorrentía media mensual se calculó con la ecuación 21 del Apéndice A, cuyo procedimiento se resume en la Figura 8.

Figura 8

Flujograma de la distribución mensual de los volúmenes de escorrentía



Nota: Elaboración propia con base en (Dal-Re, 2003).

4.5 Prediseño del pequeño embalse

La capacidad del pequeño embalse se determinó mediante la aplicación de dos métodos de cálculo que permitieron estimar el volumen de almacenamiento necesario para garantizar el suministro de agua durante los periodos de demanda agrícola, considerando las variaciones entre escurrimiento y demanda a lo largo del año (Alvarez, 2022).

4.5.1 Método del Algoritmo de Sucesión de Picos

Según Molina (1989), el método calcula la capacidad de almacenamiento a partir de la diferencia acumulada entre escurrimiento (x_i) y demanda mensual (d_i). Se identifica el primer pico (p_1) —valor máximo de la serie acumulada— y un segundo pico posterior de mayor magnitud (p_2), que indica que el pequeño embalse volvió a llenarse (Vivanco, 2017). Entre ambos picos se localiza el mínimo (t_1), y la diferencia ($p_1 - t_1$) representa el volumen de almacenamiento requerido, que debe estar disponible al final del mes de p_1 para garantizar el suministro hasta t_1 .

4.5.2 Método de la Curva de Masa Inversa

Según Molina (1989), el método determina la capacidad del pequeño embalse calculando el exceso o déficit mensual como la diferencia entre escurrimiento (Q_i) y demanda (D_i). Sumando estas diferencias acumuladas desde la última deficiencia hacía meses anteriores hasta encontrar un valor positivo, se identifican los déficits acumulados. La capacidad requerida corresponde al valor negativo más bajo de dicha serie, es decir, el volumen mínimo necesario para compensar los periodos de déficit.

4.5.3 Volumen del pequeño embalse

Para la determinación del volumen total del pequeño embalse, se aplicaron los siguientes procedimientos:

4.5.4 Volumen útil

El cálculo del volumen útil se realizó mediante la ecuación 1a.

$$V_{\text{útil}} (m^3) = V_{\text{inicial}} + A_{\text{portes}} - P_{\text{éridas}} \text{ (ecuación 1a)}$$

Donde:

- $V_{\text{útil}}$ = Volumen útil (m^3)
- V_{inicial} = Volumen inicial (m^3).
- A_{portes} = Escurrimiento de la unidad hidrológica y precipitación (m^3)
- $P_{\text{éridas}}$ = Pérdidas por evaporación, infiltración y extracciones para riego (m^3)

El volumen inicial del pequeño embalse se estimó mediante los métodos del Algoritmo de la Sucesión de Picos y la Curva de Masa Inversa. Los aportes considerados incluyeron el escurrimiento de la unidad hidrológica y la precipitación directa sobre el pequeño embalse (Alvarez, 2022).

Las pérdidas contemplaron el agua utilizada para riego, la infiltración y la evaporación del pequeño embalse (Molina, 1989). La precipitación sobre el pequeño embalse se calculó con la misma metodología empleada para estimar la oferta hídrica de la unidad hidrográfica.

La evaporación del pequeño embalse (ecuación 2a) se estimó mediante el método de Meyer, que calcula la evaporación a partir del déficit de saturación del aire y la velocidad del viento (Molina, 1989).

$$E (mm) = K \times (e_s - e_a)(1 + 0.536 \times v) \text{ (ecuación 2a)}$$

Donde:

- E = Evaporación (mm)
- K = Coeficiente empírico (0.50 para grandes superficies de agua)
- e_s = Presión de vapor de saturación a la temperatura del agua (mb)
- e_a = Presión de vapor actual del aire (mb)
- v = Velocidad promedio mensual del viento a 2 m de altura (km/h)

Este método permitió obtener una estimación más precisa de las pérdidas por evaporación del pequeño embalse a partir de datos climáticos locales, integrándolas al balance hídrico del sistema.

4.5.5 Volumen muerto

Según (Vivanco, 2017), el volumen muerto se calcula en función del volumen útil. De acuerdo con (Alvarez, 2022), este volumen suele representar entre el 8 % al 12% del volumen útil.

4.5.6 Volumen mínimo de operación

El volumen mínimo de operación se estimó de forma empírica según las características de la obra. Dado que el estudio se enfoca en determinar el volumen necesario para cubrir las demandas de riego, se asumió que este corresponde al 5 % del volumen útil (Vivanco, 2017).

4.5.7 Volumen total del pequeño embalse

El volumen final (ecuación 3a) del pequeño embalse es el resultado de la suma del volumen útil, el volumen muerto y el volumen mínimo de operación, calculado mes a mes. Es importante destacar que, en algunos periodos, la oferta hídrica puede superar la capacidad del pequeño embalse, generando derrames (Vivanco, 2017).

$$\text{Volumen total} = V. \text{util} + V. \text{muerto} + V. \text{minimo de operacion} \text{ (ecuación 3a)}$$

Se diseñó una sección transversal trapezoidal con fondo plano, definiendo altura útil (h), ancho de base (b), pendiente lateral (z), ancho superior (B) y área (A). El diseño se realizó mediante un proceso iterativo: se propuso una altura inicial para cálculos preliminares y, con el volumen requerido y la longitud del pequeño embalse, se calculó el área y el ancho de base (b), obteniendo luego el ancho superior (B). En cada iteración se verificó que el volumen y los taludes fueran constructivamente viables y estables (Chaudhry, 2008), empleando las ecuaciones 4a, 5a y 6a.

$$Area = \frac{L}{V_{requerido}} \quad (\text{ecuación 4a})$$

$$A = h(b + zh) \quad (\text{ecuación 5a})$$

$$B = b + 2zh \quad (\text{ecuación 6a})$$

4.5.8 Análisis y Selección de Alternativas para el pre-dimensionamiento de un pequeño embalse mediante Evaluación Multicriterio

Se evaluaron tres alternativas de dimensionamiento del pequeño embalse, considerando sus características técnicas, operativas y de adaptación al terreno (Pérez, 2017).

- Criterios de evaluación:
 - Viabilidad técnica (0,30): Analiza la complejidad, riesgos y factibilidad constructiva.
 - Impacto ambiental (0,20): Considera posibles efectos sobre el entorno natural.
 - Eficiencia operativa (0,25): Evalúa el funcionamiento y requerimientos del sistema.
 - Compatibilidad con el terreno (0,25): Valora la adaptación a las condiciones físicas del sitio.

Cada alternativa se calificó en una escala de 1 a 5 (1 = menos favorable, 5 = más favorable). La puntuación total se obtuvo multiplicando cada calificación por su ponderación y sumando los resultados. La alternativa con mayor puntuación se consideró la más adecuada.

4.5.9 Impacto de las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) en el prediseño del pequeño embalse

El pequeño embalse se diseñó con materiales locales, como tierra compactada, reduciendo la huella de carbono y la alteración del paisaje (Terra, 2011); (Aguilar, 2018). Además, se incorporaron medidas sostenibles como una cubierta vegetal de *Calamagrostis effusa* para estabilizar los taludes y reducir la erosión, una trampa de sedimentos que evita la acumulación de partículas y prolonga la vida útil del pequeño embalse, y un colchón reno para proteger los taludes frente a procesos de erosión y socavación en el punto de descarga del aliviadero (*Stormwater Partners*, 2021).

4.5.10 Cubierta vegetal de pasto pajonales de *Calamagrostis effusa*

Como parte de las medidas de protección superficial consideradas, se propuso la implementación de una cubierta vegetal con pasto pajonal (*Calamagrostis effusa*) (*Sembramos*, 2025), seleccionada de acuerdo con las condiciones de temperatura y altitud del sector. Esta cobertura se incluyó con el propósito de favorecer la estabilización del suelo expuesto, reducir la velocidad de la escorrentía superficial y contribuir a la disminución de procesos erosivos en el interior del pequeño embalse (Terra, 2011).

4.5.11 Colchón reno

Como parte de las medidas de protección contra la erosión en el pequeño embalse en la zona de descarga del aliviadero, se propuso la implementación de colchón reno, fabricado con malla de alambre de acero de doble torsión y relleno de roca. Se seleccionó por su capacidad para estabilizar el suelo expuesto, reducir la velocidad de la escorrentía superficial y mitigar los procesos erosivos, garantizando así su durabilidad y funcionalidad a largo plazo (Pietro, n.d.).

4.5.12 Trampa de sedimentos

Se contempló la instalación de una trampa de sedimentos como parte del sistema de entrada de agua al pequeño embalse, ubicada aguas arriba del punto de captación. Su función es retener partículas sólidas como arena, limo y arcilla, así como residuos transportados por el flujo, antes de su ingreso al almacenamiento a través de la estructura de conducción. Esta medida contribuye a reducir la acumulación de sedimentos dentro del pequeño embalse, favoreciendo la conservación de su capacidad útil y prolongando su vida operativa (*Stormwater Partners*, 2021).

4.5.13 Dren tipo pie

La función principal del dren es evitar la saturación del talud aguas abajo, ya que con ello se asegura la estabilidad del pequeño embalse, además de no comprometer el medio ambiente con daños colaterales por una posible falla si no se implementara (Terra, 2011).

4.5.14 Aliviadero

Para el prediseño del aliviadero se adoptó un vertedero de cresta ancha en concreto ciclópeo por su durabilidad y facilidad constructiva. El caudal de diseño se estimó con el Método Racional (ecuación 7a), considerando el coeficiente de escorrentía (C), la intensidad de lluvia (I) de curvas

IDF y el área de aporte (A) (Muñoz, 1997); (Invias, 2009). Con este caudal se dimensionó el vertedero (ecuación 8a) ajustando iterativamente la longitud de cresta (L) y la carga hidráulica (H) hasta garantizar una descarga segura, con coeficiente de descarga C_d de 2.16. Finalmente, se definió el espesor de cresta y una rampa de descarga con pendiente estable, ubicando el aliviadero en un extremo del pequeño embalse para facilitar su integración con las demás obras.

$$Q = C \cdot I \cdot A \quad (\text{ecuación 7a})$$

$$Q = C_d \cdot L \cdot H^3 / 2 \quad (\text{ecuación 8a})$$

4.6 Estimación de Costos del Prediseño y Recomendaciones

Para evaluar la viabilidad económica del proyecto, se elaboró una estimación de los costos potenciales asociados al prediseño del pequeño embalse. Se realizó un análisis de precios unitarios (APU), detallado en los Apéndices F que cubrió las siguientes actividades principales: excavación, relleno (*Construdata*, 2025), instalación del dren tipo pie (INVIAS, 2019), construcción de la trampa de sedimentos y establecimiento del pasto pajonales de *Calamagrostis effusa* (*Sembramos*, 2025). Mediante este análisis, se determinó la inversión total del proyecto.

4.7 Consideración del Levantamiento Topográfico y Justificación

El levantamiento topográfico detallado es fundamental para determinar con precisión los volúmenes de corte y relleno del proyecto. Según Alvarez (2022), se recomienda realizarlo directamente en campo, ya que el uso exclusivo de información generada por software puede generar errores en las estimaciones.

Por esta razón, se incluyó en el presupuesto la contratación de una entidad especializada para realizar el levantamiento topográfico, además de los costos de construcción, con el fin de asegurar datos confiables para el desarrollo del proyecto.

5. Resultados

5.1 Parámetros morfométricos

En la Tabla 1 se presentan los parámetros morfométricos de la unidad hidrológica, los cuales también se emplearon para estimar la escurrentía y evaluar la viabilidad del diseño del pequeño embalse.

Tabla 1

Parámetros morfométricos

Parámetros de la cuenca	Valor unidad	Unidad
Área	0.056	Km ²
Perímetro	1.602	Km
Longitud axial	0.465	Km ²
Ancho máximo	0.184	Km ²
Cota máxima cuenca	3448	msnm
Cota mínima de la cuenca	3388	msnm
Cota máxima c.p (cauce principal)	3425	msnm
Longitud de todos los causes	2.165	Km
Longitud c.p (cause principal)	0.521	Km
Intervalos curvas nivel	5	msnm
Desnivel	60	m
Pendiente media	0.115	m/m
Tiempo de concentración.	0.09	h

Nota: Elaboración propia

Los parámetros morfométricos caracterizan la unidad hidrológica como un área pequeña (0,056 km²) y con un tiempo de concentración reducido (0,092 h), lo que indica una respuesta rápida a eventos de lluvia. El desnivel de 60 m y la pendiente media de 0,115 m/m evidencian una

topografía marcada que favorece la escorrentía superficial. Asimismo, la longitud del cauce principal y la red de drenaje muestran un sistema definido que concentra el flujo en corto tiempo.

5.2 Análisis hidrológico y demanda hídrica

5.2.1 Evapotranspiración del cultivo de referencia

Los registros climáticos fueron obtenidos de la estación Berlín (37015020) del IDEAM (Gómez, 2022), correspondiente al área de estudio.

Los datos utilizados son promedios mensuales multianuales, lo que permite describir de manera general y estable el comportamiento climático de la región durante 30 años.

La Tabla 2 presenta este comportamiento promedio, evidenciando un clima frío y árido, con alta radiación solar, característico de zonas de alta montaña o páramo.

Tabla 2

Datos climatológicos

Mes	Temp mín °C	Temp max °C	Humedad %	Viento m/s	Insolación horas	Radiación MJ/m ² /día
Enero	1.8	14.5	85	3.6	11.6	24.9
Febrero	2.6	14.9	84	3.8	11.7	26.4
Marzo	4.1	14.9	86	3.9	11.9	27.8
Abril	5.7	14.3	88	3.8	12.1	28.1
Mayo	6.2	13.9	88	4.4	12.3	27.6
Junio	5.9	12.9	88	5.6	12.4	27
Julio	5.6	12.4	88	5.8	12.3	27.1
Agosto	5.5	13.1	87	5.0	12.2	27.8
Septiembre	5.3	13.7	86	4.1	12	27.8
Octubre	5.3	13.8	87	3.6	11.8	26.7
Noviembre	4.8	13.8	87	3.3	11.6	25.1
Diciembre	3.2	13.9	86	3.8	11.5	24.2
Promedio mensual	4.7	13.8	86.7	4.2	12.0	26.7

Nota: (Gomez, 2020)

La estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) se realizó mediante el software CROPWAT, herramienta desarrollada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) para el cálculo de requerimientos hídricos a partir de parámetros climáticos.

Los resultados, presentados en la Tabla 3, muestran un valor mínimo de ET_o de 2.96 mm/día en el mes de julio y un valor máximo de 3.54 mm/día en marzo. Esta variación refleja cambios en las condiciones climáticas locales dentro del mismo año, principalmente asociados a la radiación solar, la temperatura y la humedad relativa, factores que influyen directamente en la demanda evaporativa del cultivo.

Tabla 3

Evapotranspiración de referencia (ET_o) – Promedios mensuales multianuales estimados con CROPWAT

mes	Et _o (mm/día)	Et _o (mm/mes)
Enero	3.14	97.34
Febrero	3.4	95.2
Marzo	3.54	109.74
Abril	3.51	105.3
Mayo	3.34	103.54
Junio	3.03	90.9
Julio	2.96	91.76
Agosto	3.22	99.82
Septiembre	3.42	102.6
Octubre	3.32	102.92

mes	Eto (mm/día)	Eto (mm/mes)
Noviembre	3.12	93.6
Diciembre	2.97	92.07

Nota: Elaboración propia

5.2.2 Demanda hídrica de los cultivos

La ETo se calculó en mm/día y se convirtió a mm/mes para el balance hídrico mensual (Carrazón, 2007). La precipitación efectiva se estimó con el método USDA-SCS a partir de la precipitación mensual multianual, calculando la frecuencia relativa de ocurrencia y trazando una línea de tendencia para obtener el valor correspondiente a una probabilidad de excedencia del 75% para cada mes (Cruz, 2015). Los resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4

Precipitación efectiva – Totales mensuales multianuales estimados con CROPWAT

mes	Precipitación (mm)	Prec. Efectiva (mm)
Enero	14.1	13.8
Febrero	22.5	21.7
Marzo	43.6	40.6
Abril	80.7	70.3
Mayo	84.9	73.4
Junio	67.3	60.1
Julio	54.7	49.9
Agosto	67.7	60.4
Septiembre	87.3	75.1
Octubre	94.1	79.9

mes	Precipitación (mm)	Prec. Efectiva (mm)
Noviembre	58	52.6
Diciembre	15.9	15.5
Total	690.8	613.2

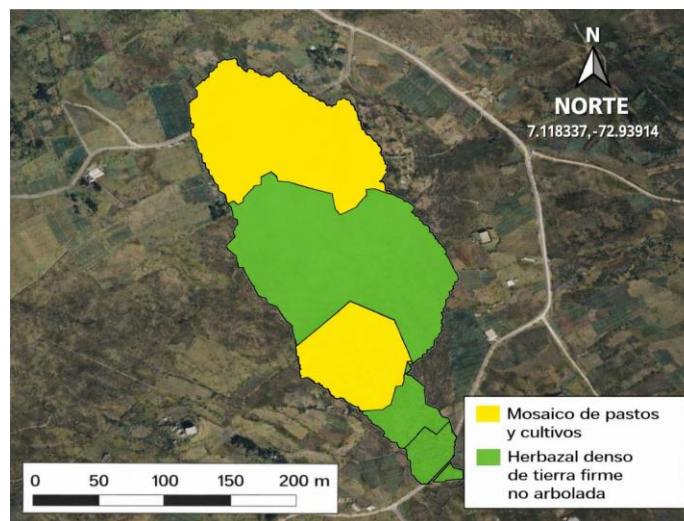
Nota: Elaboración propia con base en Doorenbos y Pruitt (1992)

5.2.3 Revisión geotécnica del tipo de cobertura de la unidad hidrológica seleccionada

Se identificaron dos coberturas: mosaico de pastos y cultivos (46%, color amarillo) y herbazal denso de tierra firme no arbolado (54%, color verde) (Figura 9) (IGAC, 2025). El suelo predominante es de textura franco-arcillosa arenosa (Arenas, 2005), lo que condiciona el comportamiento hidrológico de la cuenca en términos de escurrentía, retención e infiltración.

Figura 9

Distribución de coberturas del suelo en la cuenca hidrográfica



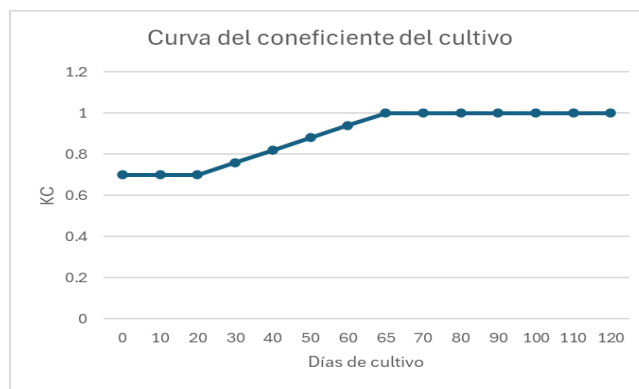
Nota: Elaboración propia

5.2.4 Caracterización del cultivo, coeficientes de cultivo (K_c) y necesidades netas de riego

Para estimar las necesidades netas de riego en cada escenario, según Carrazón (2007), se utilizaron los coeficientes de cultivo (K_c) recomendados. Estos fueron interpolados con base en la duración total del ciclo (120 días), permitiendo su distribución proporcional en cada etapa fenológica. La Tabla 11 del Apéndice E presenta los valores obtenidos, y la Figura 10 muestra el comportamiento del K_c durante el ciclo del cultivo.

Figura 10

Comportamiento típico del coeficiente de cultivo (K_c) a lo largo del ciclo de la cebolla de rama

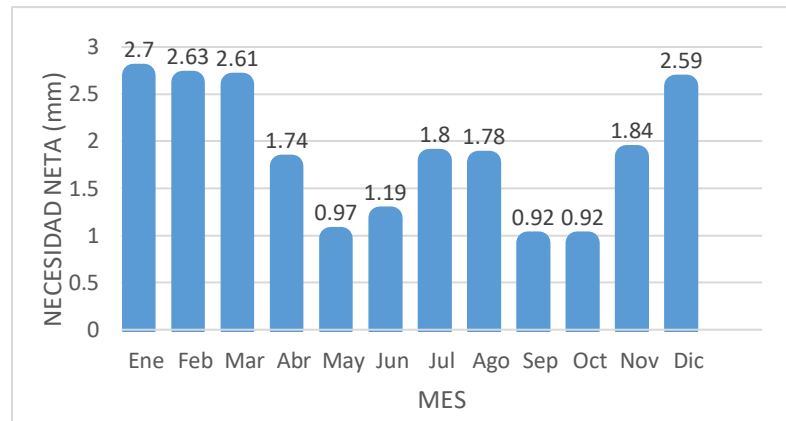


Nota: Elaboración propia

Con los coeficientes interpolados, los valores de evapotranspiración y precipitación efectiva, se calcularon las necesidades netas mensuales para cada escenario. Para cada mes se seleccionó el valor máximo entre los cuatro escenarios, construyendo una serie de demandas hídricas del cultivo máximas que garantiza un diseño eficiente del pequeño embalse (Carrazón, 2007). Los resultados se presentan en la Tabla 15 (Apéndice E) y la Figura 11.

Figura 11

Demanda neta mensual máxima seleccionada por mes del año



Nota: Elaboración propia

Asimismo, toda la información detallada y completa de los cuatro escenarios de siembra simulados se encuentra disponible en el Apéndice B.1.

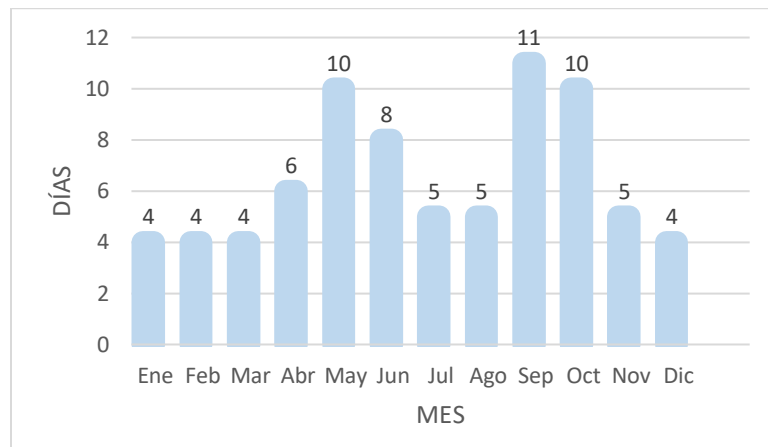
5.2.5 Determinación de la Dosis Neta de Riego y Frecuencia

Para el cálculo del requerimiento hídrico destinado al riego se emplearon los siguientes parámetros edáficos: una infiltración básica de 20 mm/h (Rojas, 1996), una densidad aparente de 0,97 g/cm³, un punto de marchitez permanente del 44,27 % y un contenido de agua aprovechable del 19,252 %, según Naranjo (2025), así como una profundidad efectiva de raíces de 0,45 m correspondiente al cultivo de cebolla de rama (Galindo, 2024). Con base en estos parámetros se determinó la dosis neta de riego y el intervalo máximo entre riegos; posteriormente, asumiendo un sistema de riego por aspersión, se calculó la dosis bruta y se estimó un tiempo de aplicación de 48 minutos diarios. La variación mensual de la precipitación incide directamente en la dosis bruta y en los intervalos de riego, de modo que a mayores valores de precipitación corresponde una menor dosis de riego y

un mayor intervalo entre aplicaciones (Carrazón, 2007). Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 12 y en la Tabla 16 (Apéndice E)

Figura 12

Intervalo máximo entre riegos por mes

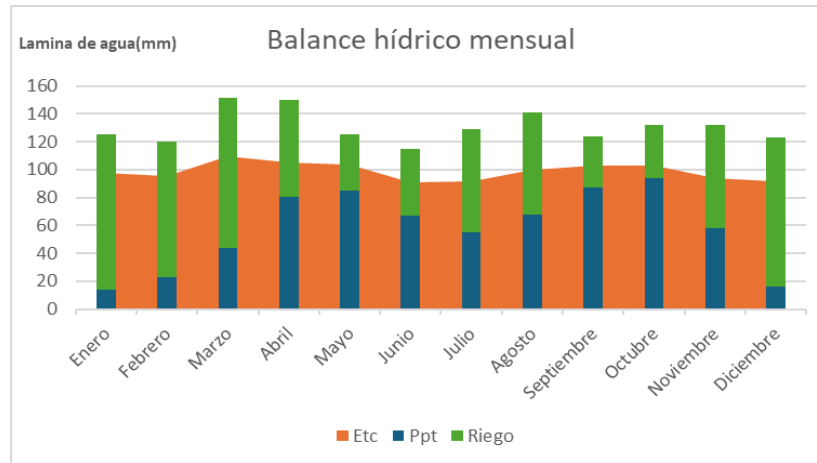


Nota: elaboración propia

Adicionalmente, la Figura 13 muestra el balance hídrico mensual, comparando la demanda del cultivo (ETc) con la precipitación (Ppt) y las necesidades de riego suplementario. Se evidencia que la precipitación efectiva solo cubre parte de la demanda total, siendo el riego (barras verdes) el principal componente para satisfacer los requerimientos del cultivo, especialmente en el primer trimestre del año.

Figura 13

Balance hídrico mensual entre dosis bruta de riego, precipitación efectiva y ETC



Nota: Elaboración propia

5.3 Determinación de la oferta hídrica

5.3.1 Determinación del número de curva (NC) y de la máxima retención Posible (S)

Tras distribuir proporcionalmente las coberturas según las áreas del inciso 4.2.3, se determinó un valor ponderado del NC equivalente para toda el área de la cuenca, según Dal-Re (2003), obteniendo un Número de Curva de 77,88. Los valores de NC utilizados para cada tipo de cobertura y grupo hidrológico del suelo se detallan en el Apéndice C.2.

El ajuste mensual se efectuó considerando el número medio de días de lluvia por mes (Apéndice C.3) y las condiciones de Humedad Antecedente (AMC), según Dal-Re (2003). Con estos valores se calculó el parámetro S, definido como la máxima retención de humedad del suelo, obteniendo 72,16 mm para la unidad hidrológica. El resumen se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5

Coefficientes de ajuste para condiciones de Humedad Antecedente (AMC I, II y III)

Mes	Pi(mm)	Nt	Pi/4	AMC
Ene	14.1	6		II
Feb	22.5	7		II
Mar	43.6	12		III
Abr	80.7	17	20.175	II-III
May	84.9	19	21.225	II-III
Jun	67.3	16	16.825	II-III
Jul	54.7	13	13.675	II-III
Ago	67.7	14	16.925	II-III
Sep	87.3	18	21.825	II-III
Oct	94.1	18	23.525	II-III
Nov	58	14	14.5	II-III
Dic	15.9	8		II

Nota: Adaptado de Tenreiro, “Pequeños embalses de uso agrícola”.

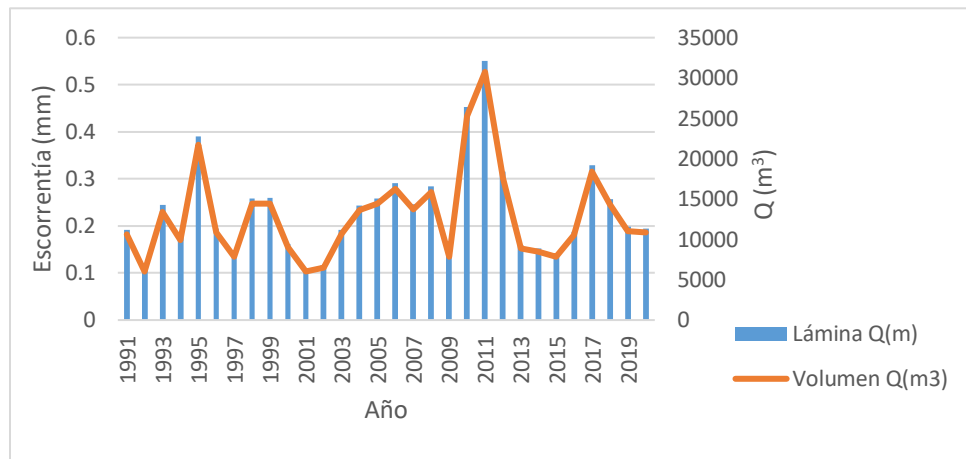
5.3.2 Determinación del escurrimiento anual del sector hidrológico (método de Coutagne)

De acuerdo con la metodología de Dal-Re (2003), se asume que solo el 20 % de la retención posible se infiltra efectivamente en el suelo. Aplicando este factor al valor de S (72,16 mm), se obtuvo una infiltración efectiva de 0,014 m. Con base en este resultado, se determinó el valor de λ (lambda). En la Figura 14 se presentan los resultados de la esorrentía anual, expresados en lámina de agua y volumen. El detalle de los cálculos realizados para cada año se encuentra en el Apéndice C.4. Como resultado, se obtuvo un volumen promedio anual de escurrimiento de 12.911,5 m³ y

una escorrentía en lámina de agua de 0,231 m para la unidad hidrológica, para más información en el Apéndice E tabla 17, se encuentra la información correspondiente a la gráfica.

Figura 14

Escorrentía generada en lámina de agua y volumen anual para cada año



Nota: elaboración propia

5.3.3 Determinación del escurrimiento mensual del sector hidrológico mediante el método del coeficiente de ajuste (K)

Se definió que el periodo entre abril y noviembre corresponde al periodo húmedo, al cual se asignan condiciones AMC II–III, como se indica en la Tabla 18 (Apéndice E). En estos meses se calcula la cuarta parte de la precipitación mensual y se compara con los rangos del periodo húmedo. Aunque numéricamente coinciden con los del periodo seco, su aplicación difiere debido a la mayor humedad antecedente del suelo, lo que influye en la selección de la condición AMC.

El cálculo incluyó el coeficiente de ajuste K, determinado iterativamente con base en la fórmula de escorrentía anual, buscando el valor más cercano a 0,231 m, correspondiente a la escorrentía anual obtenida mediante el método de Coutagne.

El coeficiente K adoptado debía garantizar que el promedio mensual de escorrentía (lámina de agua) fuera igual al promedio anual estimado con el método de Coutagne (Apéndice C.4). Para ello, se partió del valor de escorrentía directa anual (Q anual) y se evaluaron distintos valores de K, calculando la escorrentía mensual mediante la expresión $Q_i = f(K, P_i, S_i)$ y sumando los aportes para obtener la escorrentía anual. El valor adoptado fue $K = 0,83$, al ser el que mejor reprodujo el Q anual, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6

Determinación mensual del coeficiente K en función de la precipitación media mensual multi anual y el parámetro S

<i>K</i>	<i>0.83</i>
<i>Enero</i>	<i>0.00010726</i>
<i>Febrero</i>	<i>0.00023564</i>
<i>Marzo</i>	<i>0.01481866</i>
<i>Abril</i>	<i>0.03031144</i>
<i>Mayo</i>	<i>0.03305837</i>
<i>Junio</i>	<i>0.02190647</i>
<i>Julio</i>	<i>0.01464834</i>
<i>Agosto</i>	<i>0.02214827</i>
<i>Septiembre</i>	<i>0.03464861</i>
<i>Octubre</i>	<i>0.03922784</i>
<i>Noviembre</i>	<i>0.01647594</i>
<i>Diciembre</i>	<i>2.1503E-05</i>
<i>Escorrentía total</i>	<i>0.22760834</i>

Nota: Elaboración propia con base en Dal-Re (2003).

Usando este coeficiente, se calcularon los volúmenes mensuales finales. Además, se aplicó la condición propuesta por Dal-Re (2003) para los meses secos:

Si el producto de K por la precipitación mensual (P_i) es menor que 0,2 veces el parámetro S ($K \times P_i < 0,2 \times S$), entonces la escorrentía directa Q (mm) será igual a cero (0).

Esta condición se cumplió en enero y diciembre, meses que no generarán aportes significativos al pequeño embalse. Los resultados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7

Escorrentía mensual generada en lámina de agua para cada mes, ajustada con el coeficiente $K = 0.83$

mes	Volumen(m ³)	Volumen total(m ³)
Enero	0.00	0
Febrero	13.166	13.166
Marzo	827.963	841.13
Abril	1693.591	2534.72
Mayo	1847.070	4381.79
Junio	1223.98	5605.77
Julio	818.447	6424.22
Agosto	1237.49	7661.71
Septiembre	1935.92	9597.63
Octubre	2191.78	11789.41
Noviembre	920.56	12709.97
Diciembre	0.00	12709.97

Nota: Elaboración propia con base en Dal-Re (2003).

Como resultado, se obtuvo un volumen total de escurrimiento de 12,709.97 m³ para la unidad hidrológica.

5.4 Propuesta de diseño para la capacidad de un pequeño embalse

5.4.1 Método del algoritmo de sucesión de picos o pico se cuenta

Durante el análisis, se identificaron los meses con déficit hídrico (Apéndice D.1), lo que reveló la necesidad de almacenamiento para compensar la deficiencia en los cultivos. A partir de ello, se determinaron los picos acumulados (p_1 , p_2) y los valores intermedios (t_1), obteniendo así la capacidad útil del pequeño embalse. El resultado final fue el mismo en ambos casos: 4527.4 m³, volumen necesario para cubrir el déficit hídrico de forma eficiente.

5.4.2 Método de la curva de masa a la inversa

El presente método se fundamenta en la relación oferta-demanda hídrica. El valor más bajo de la acumulación corresponde al volumen útil del pequeño embalse: 4527.4 m³. Dado que este resultado coincide con el obtenido mediante el algoritmo de sucesión de picos, ambas metodologías se consideran equivalentes y pueden emplearse de forma indistinta para el diseño del pequeño embalse.

5.4.3 Balance hídrico en el pequeño embalse

En el pequeño embalse ocurren diferentes entradas y salidas de agua que deben considerarse para un adecuado balance hídrico. Estos flujos se describen en los apartados siguientes.

5.4.3.1 Precipitación en el pequeño Embalse

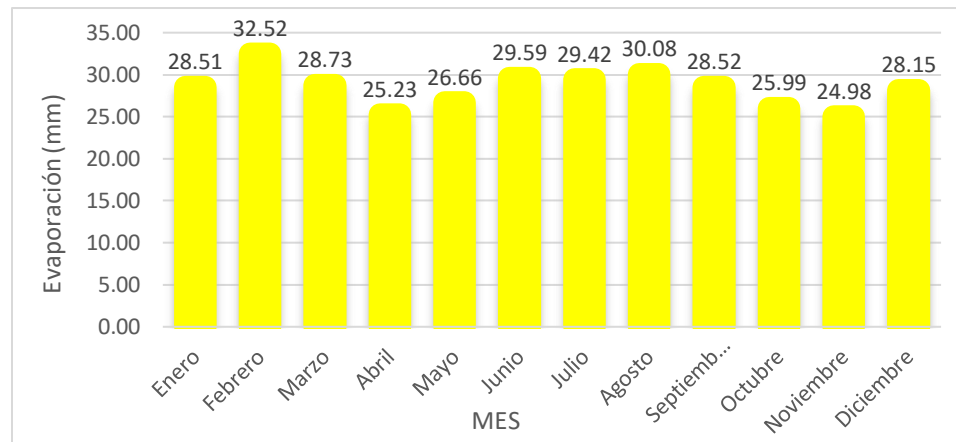
Debido a que el embalse hace parte de la unidad hidrológica evaluada, la precipitación efectiva calculada para la zona de estudio se considera representativa para este. Los resultados se muestran en la **Tabla 4** previamente presentada.

5.4.3.2 Evaporación del pequeño Embalse

La evaporación superficial del pequeño embalse se estimó mediante el método de Meyer (Apéndice D.3), lo que permitió calcular la evapotranspiración mensual específica del cuerpo de agua (Wambeke, 2013), en la Figura 15 se presentan los resultados. La información detallada también se encuentra en la Tabla 19, Apéndice E.

Figura 15

Evaporación del Embalse



Nota: Elaboración propia

5.4.3.3 Cálculo del Volumen Total del pequeño Embalse

El cálculo del balance hídrico total correspondiente al volumen total del pequeño embalse se encuentra documentado en el Apéndice D.4. A continuación, la Tabla 8 presenta un resumen de los principales parámetros considerados y de los resultados obtenidos.

Tabla 8

Resumen de todos los parámetros considerados y resultados obtenidos

Volumen útil	4527.401	(m ³)
Vol. muerto	11.690	(m ³)
Vol. operación	12.275	(m ³)
Vol. forzado	50.285	(m ³)
Vol. total	4601.650	(m ³)

Nota: elaboración propia

5.5 Diseño preliminar del pequeño embalse y obras asociadas

Este apartado detalla las consideraciones y soluciones propuestas para el prediseño del pequeño embalse, con énfasis en la estabilidad estructural, la funcionalidad hidráulica y la sostenibilidad ambiental del sistema Dal-Re (2003). Este apartado se realizó con las recomendaciones y especificaciones técnicas propuestas por Terra (2011).

5.5.1 Tipo de Material y Configuración del Dique

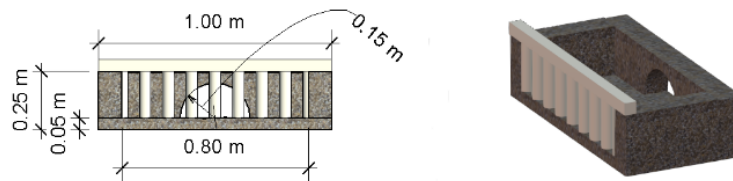
Por razones económicas y de disponibilidad de materiales, se optó por un pequeño embalse de tierra homogéneo, tipo común y apropiado para pequeños reservorios agrícolas (Terra, 2011). El talud del dique se diseñó con una inclinación uniforme de 2:1 (horizontal: vertical), según recomienda esta misma Nota. Además, siguiendo a Doorenbos y Pruitt (1992), para suelos con componentes arenosos —como el franco arcilloso arenoso del área— se determinó un ancho de corona de 1 metro.

5.5.2 Diseño de la trampa de sedimentos

Para la gestión de los sedimentos, siguiendo los lineamientos propuestos por Sembramos (2025), se diseñó una trampa de sedimentos construida con vigas de 0,10 m × 0,20 m y un canal de polietileno reforzado con acero galvanizado, de acuerdo con Cunia (2005). La estructura incorpora un orificio de salida con un diámetro de 15 cm. La trampa presenta dimensiones de 1,0 m de ancho y 0,5 m de profundidad, tal como se muestra en la Figura 16, y responde a criterios técnicos utilizados en sistemas de manejo de escorrentía (*Stormwater Partners, 2021*).

Figura 16

Dimensiones de la trampa de sedimentos y su vista tridimensional



Nota: Elaboración propia con licencia académica de Autodesk Revit.

5.5.3 Análisis de alternativas para el pre dimensionamiento del pequeño embalse

Para el pre dimensionamiento del pequeño embalse se evaluaron tres alternativas de diseño con base cuadrada y sección trapezoidal (Dal-Re, 2003), configuración que permite pendientes laterales suaves y mejora la estabilidad estructural frente a procesos de erosión y deslizamientos (Terra, 2011). Las alternativas fueron comparadas a partir de criterios técnicos, operativos, ambientales y de compatibilidad con el terreno. La Figura 17 presenta la localización y superficie ocupada por cada alternativa y la Tabla 9 resume los resultados de la matriz de evaluación.

Figura 17

Alternativas evaluadas para el pre dimensionamiento del embalse con base cuadrada y sección trapezoidal: alternativa 1 (rojo), alternativa 2 (morado) y alternativa 3 – diseño óptimo (azul)



Nota: Elaboración propia a partir de Google Earth

5.5.3.1 Alternativa 1: Área Superficial del pequeño Embalse Artificial Base (Color Rojo)

La alternativa 1, representada en color rojo (Figura 17), corresponde a un pequeño embalse con un área superficial de 228 m², que requeriría una altura aproximada de 20 m para alcanzar el volumen útil de diseño. Sus dimensiones geométricas serían de 14 m × 14 m en la base mayor y 10,8 m × 10,8 m en la base menor. A pesar de su reducido requerimiento de área, esta alternativa fue descartada por su baja viabilidad técnica, asociada a posibles complicaciones geológicas, limitada estabilidad del suelo y elevadas exigencias energéticas para el bombeo del agua, lo que incrementa los riesgos constructivos y operativos.

5.5.3.2 Alternativa 2: Área superficial mayor (color morado)

La alternativa 2 (color morado, Figura 17) presenta un área superficial de aproximadamente 2 300 m², con dimensiones de 45 m × 45 m en la base y 54,83 m × 54,83 m en la corona, y una altura de 2 m. Esta configuración mejora las condiciones operativas y reduce los requerimientos energéticos para el bombeo en comparación con la alternativa 1. No obstante, fue descartada debido

a su interferencia directa con una vía existente y al mayor grado de intervención del terreno requerido, lo que incrementa su impacto ambiental y limita su compatibilidad con el sitio.

5.5.3.3 Alternativa 3: Diseño óptimo del pequeño embalse (color azul)

La alternativa 3 (color azul, Figura 17) obtuvo la mayor puntuación en la matriz de evaluación y fue seleccionada como el diseño óptimo. Esta opción propone una altura total de 2,5 m, dimensiones en planta de 45,3 m \times 45,3 m, una base cuadrada de 40,37 m \times 40,37 m, una lámina de agua útil de 2,45 m y un ancho de corona de 1 m. Esta configuración ofrece un equilibrio adecuado entre capacidad de almacenamiento, eficiencia operativa y adaptación al terreno, sin interferir con vías de acceso ni con infraestructuras existentes. Los planos correspondientes al diseño seleccionado se presentan en las Ilustraciones 18, 19 y 20.

La evaluación de las alternativas evidenció diferencias significativas en su desempeño técnico, ambiental, operativo y de adaptación al terreno. En términos de viabilidad técnica, la alternativa 1 fue la menos favorable debido a la elevada altura requerida y a los riesgos geotécnicos asociados, mientras que la alternativa 3 presentó una geometría estable y factible bajo las condiciones del sitio.

Respecto al impacto ambiental, la alternativa 2 mostró el mayor nivel de afectación al interferir con una vía existente y requerir una mayor área de intervención, en contraste con la alternativa 3, que se integró adecuadamente al entorno sin generar conflictos con infraestructuras cercanas.

En cuanto a la eficiencia operativa, la alternativa 1 presentó altas exigencias energéticas para el bombeo, mientras que la alternativa 3 ofreció un balance óptimo entre capacidad de almacenamiento y facilidad de operación.

Finalmente, la compatibilidad con el terreno fue más limitada en las alternativas 1 y 2 debido a restricciones de espacio y adaptación topográfica, mientras que la alternativa 3 se ajustó de forma adecuada a las condiciones físicas del sitio. Como resultado del análisis ponderado, la alternativa 3 obtuvo la mayor puntuación total, lo que justifica su selección para el pre dimensionamiento del pequeño embalse.

En la Tabla 9 se presenta la matriz de evaluación, la cual incluye las calificaciones asignadas a cada una de las alternativas de diseño, así como sus respectivas ponderaciones parciales y la puntuación total obtenida.

La Figura 18 presenta la vista en planta del pequeño embalse, la Figura 19 la vista tridimensional y la Figura 20 todas sus dimensiones y elementos en vista frontal.

Tabla 9

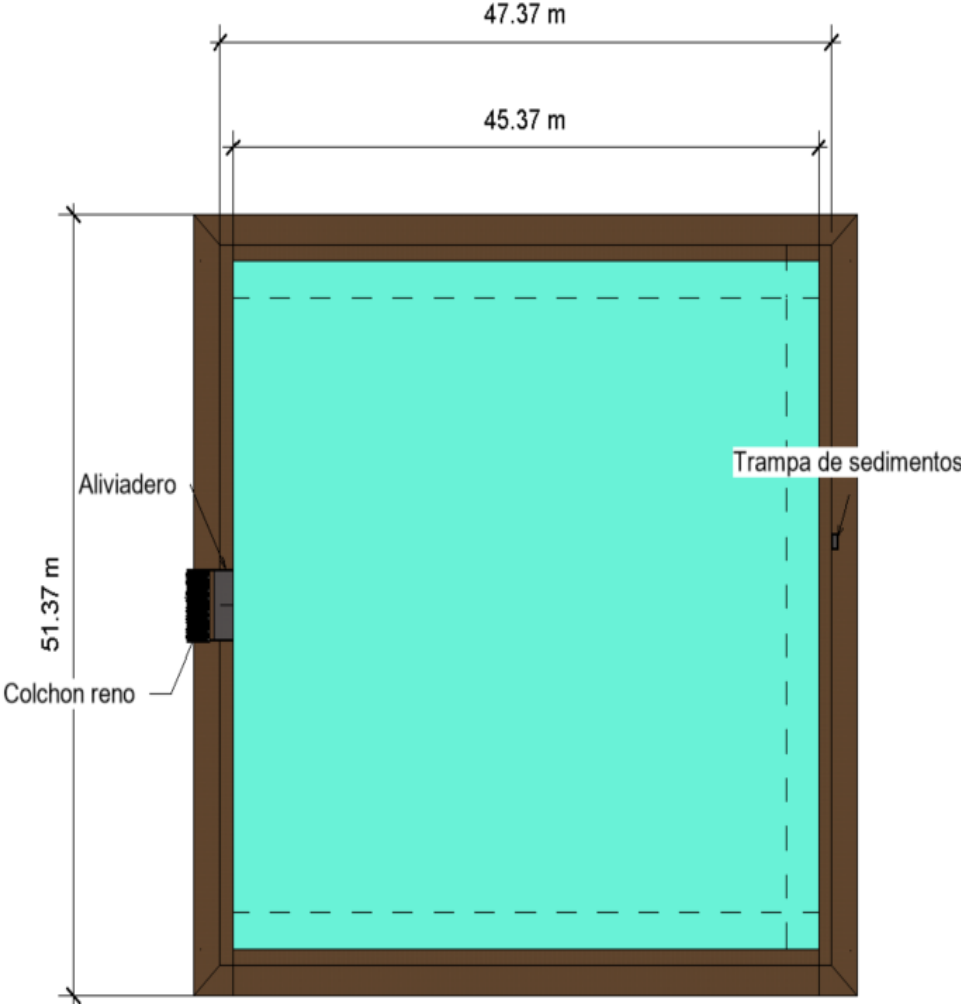
Matriz de evaluación

Criterio	Ponderación	Calificación		
		Alternativa 1 (Rojo)	Alternativa 2 (Morado)	Alternativa 3 (Azul)
Viabilidad Técnica	0.30	1 (Inviabile por complicaciones geológicas)	3 (Viable, pero con limitaciones)	5 (Óptima estabilidad y factibilidad)
Impacto Ambiental	0.20	3 (Moderado, sin conflictos viales)	1 (Conflicto con carretera)	5 (Sin interferencias)
Eficiencia Operativa	0.25	1 (Altas exigencias energéticas)	4 (Mejor bombeo)	5 (Equilibrio óptimo)
Compatibilidad con el Terreno	0.25	3 (Área mínima, limitada)	2 (Excede espacio disponible)	5 (Adecuación ideal)
Puntuación Total	1	1.75	2.55	5.00

Nota: elaboración propia

Figura 18

Vista en planta del pequeño embalse elegido



Nota: Elaboración propia con licencia académica de Autodesk Revit.

Figura 19

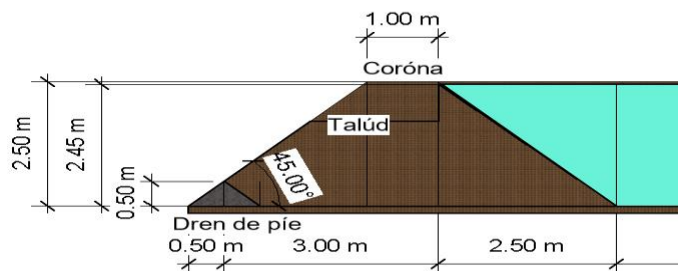
Vista tridimensional del pequeño embalse elegido



Nota: Elaboración propia con licencia académica de Autodesk Revit.

Figura 20

Dimensiones del pequeño embalse



Nota: Elaboración propia con licencia académica de Autodesk Revit.

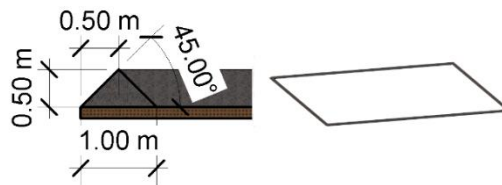
5.5.4 Soluciones para el control de erosión y estabilidad

Para mitigar procesos erosivos y garantizar la estabilidad estructural y funcional del pequeño embalse, el prediseño incorpora diversas obras de protección y control. En el interior del

dique se propone la implementación de una cubierta vegetal con *Calamagrostis effusa*, con una densidad aproximada de cinco plantas por metro cuadrado, la cual contribuye a la estabilización superficial del talud, la reducción de la escorrentía y la protección del suelo frente a la erosión hídrica (Dal-Re, 2003); (Sembramos, 2025); (Pietro, n.d.). Adicionalmente, debido a que la altura del dique es inferior a 5 m, se incorporó un dren de pie, diseñado con una cuña de 0,5 m de altura (equivalente a una quinta parte de la altura total del dique), una base de 1 m y material filtrante de grava de ¾ de pulgada, con el fin de facilitar la evacuación de filtraciones y reducir presiones internas, de acuerdo con los criterios recomendados por Dal-Re (2003). La disposición de estas obras se presenta en la Figura 21.

Figura 21

Dimensiones del dren y vista tridimensional



Nota: Elaboración propia con licencia académica de Autodesk Revit

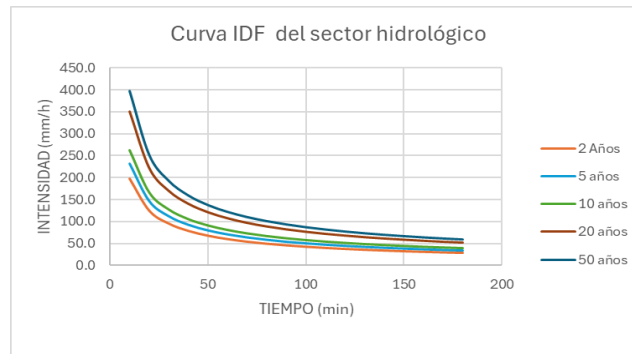
5.5.4.1 Aliviadero

El aliviadero del pequeño embalse fue pre dimensionado como un vertedero de cresta ancha en concreto ciclópeo, conforme a los lineamientos establecidos por Terra (2011). El caudal de diseño, estimado en 8,99 m³/s, se determinó mediante la aplicación del Método Racional, considerando el aporte de dos tipos de cobertura del suelo dentro del área de drenaje: herbazal denso no arbolado (C = 0,45; A = 0,025612 km²) y mosaico de pastos y cultivos (C = 0,35; A = 0,030261 km²). Para el cálculo se empleó una intensidad de precipitación de 398,20 mm/h, correspondiente a un período de retorno de 100 años, obtenida a partir de las curvas IDF de la estación Picacho (IDEAM

23190300) y los criterios de diseño de Invias (2009), tal como se detalla en la Figura 22 y en la Tabla 20 (Apéndice E).

Figura 22

Curva IDF método simplificado

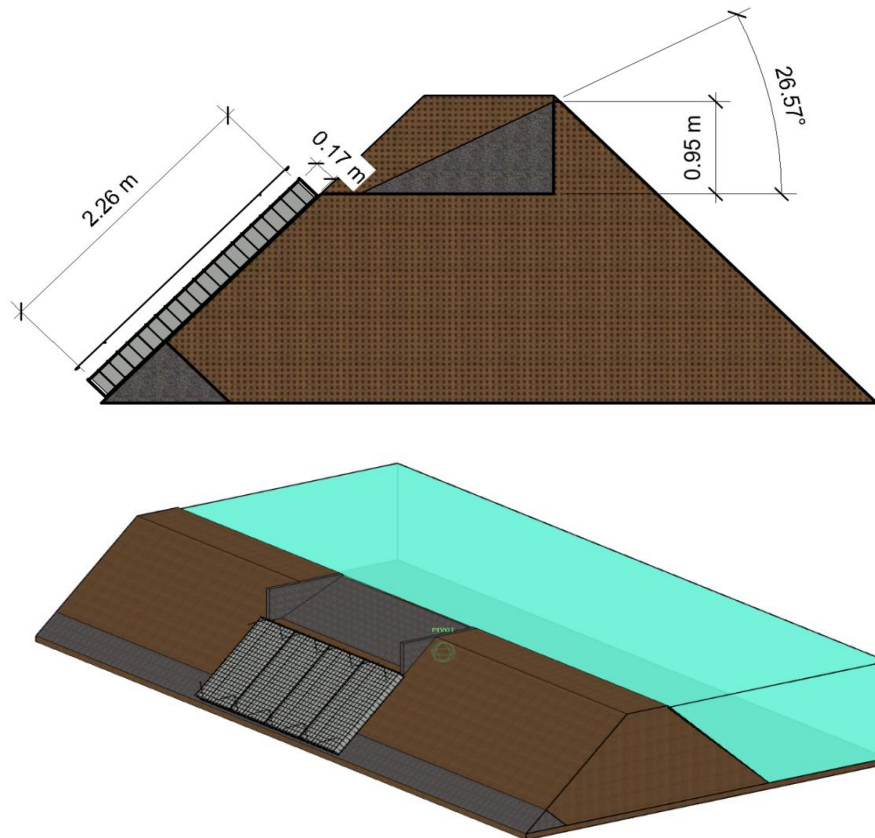


Nota: Elaboración propia con base en (Invias, 2009)

Con base en este caudal, se dimensionó un vertedero con un ancho de cresta de 4,5 m, una carga hidráulica de 0,95 m y una profundidad de flujo de 0,63 m. La estructura incorpora una rampa de descarga con pendiente 2H:1V (26,5°), un espesor mínimo de losa de 0,40 m y un coeficiente de descarga $C_d = 2,16$, valor que se encuentra dentro del rango recomendado para condiciones de flujo libre (Terra, 2011). Para el control de la energía del flujo y la protección del cauce aguas abajo, se dispuso un colchón Reno de 0.17 m de espesor, mismo ancho y una longitud de 2.26 m en la salida del aliviadero, según Pietro (n.d.) esto es lo recomendable para caudales que estén entre 7 a 9 metros cúbicos, ya que permite disipar la energía cinética del caudal vertido y prevenir procesos de socavación en el entorno inmediato. El esquema general del aliviadero se presenta en la Figura 23.

Figura 23

Dimensiones del aliviadero, colchón reno y vista tridimensional



Nota: Elaboración propia con licencia académica de Autodesk Revit.

5.5.4.2 Estimación de Costos

A continuación, la Tabla 10 presenta los costos discriminados por cada actividad y el costo total estimado del proyecto, al mismo tiempo en el Apéndice F se encuentra los formatos APU con que se determinaron estos valores.

Tabla 10

Costo del proyecto

Ítem	Valor (\$)
Levantamiento topográfico	\$ 7.362.640
Excavación	\$ 130.804.246
Relleno	\$ 125.869.536
Dren tipo pie	\$ 10.003.800
Trampa de sedimentos	\$ 1.685.698
Cubierta vegetal	\$ 20.520.900
Aliviadero	\$ 25.388.445
Colchón reno	\$ 1.598.046
Costo del proyecto	\$ 323.233.311

Nota: Elaboración propia

5.5.5 Impacto de las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) en el prediseño del pequeño embalse

El prediseño del pequeño embalse incorpora principios de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) al priorizar la captación y almacenamiento de agua lluvia y escorrentía superficial, reduciendo la necesidad de captaciones directas en quebradas y nacimientos. Esta estrategia contribuye a disminuir la presión sobre las Notas hídricas naturales y a mantener los flujos ecológicos del ecosistema de páramo.

El diseño del pequeño embalse, de material homogéneo, integra elementos técnicos orientados a la sostenibilidad y a la mitigación de impactos ambientales. Entre ellos se incluyen la revegetación de los taludes con *Calamagrostis effusa*, la implementación de una trampa de sedimentos y la incorporación de un dren tipo pie, los cuales favorecen la estabilidad estructural,

el control de la erosión y la evacuación segura de filtraciones. Estas medidas permiten imitar procesos naturales de estabilización del suelo e infiltración, facilitando la integración de la infraestructura con el entorno.

Adicionalmente, el uso de un colchón Reno en la salida del aliviadero contribuye a la disipación de la energía del flujo durante eventos de crecientes, previniendo procesos de socavación y erosión aguas abajo. De igual manera, la selección de un aliviadero de cresta ancha favorece un comportamiento hidráulico estable y coherente con condiciones de flujo libre, reduciendo impactos concentrados sobre el cauce receptor. En conjunto, estos elementos pueden considerarse soluciones híbridas, que combinan infraestructura gris con principios ecosistémicos, en concordancia con lo planteado por Terra (2011) y Stormwater Partners (2021).

De esta manera, el pequeño embalse no se concibe únicamente como una obra de almacenamiento hídrico, sino como una intervención adaptativa que complementa y refuerza los procesos naturales de regulación hídrica del ecosistema de páramo. La integración de estas SbN permite optimizar el balance hídrico, mejorar la eficiencia del uso del agua para la actividad agrícola y preservar la estabilidad ambiental del páramo de Berlín, promoviendo una armonización entre la productividad agrícola y la conservación del ecosistema.

6. Discusiones

El prediseño del pequeño embalse propuesto en este estudio representa una alternativa técnica que trasciende el enfoque tradicional de la infraestructura hidráulica, al incorporar principios de sostenibilidad y de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) en un ecosistema estratégico como el páramo. A diferencia de las obras hidráulicas convencionales, orientadas principalmente a maximizar el almacenamiento y la regulación del recurso hídrico, la propuesta desarrollada prioriza la integración con los procesos naturales del sistema hidrológico y la minimización de los impactos ambientales.

Los resultados del balance hídrico y del análisis de alternativas indican que es posible satisfacer la demanda hídrica del cultivo de cebolla de rama mediante una infraestructura de pequeña escala, alimentada principalmente por precipitación y escorrentía superficial. Esta condición permite reducir de manera significativa la presión sobre nacimientos y quebradas, aspecto particularmente relevante en ecosistemas de páramo, donde la captación directa de Notas hídricas ha sido identificada como una de las principales amenazas a la regulación hidrológica natural.

Desde el punto de vista técnico y ambiental, el diseño del pequeño embalse incorpora elementos propios de la infraestructura verde, como la revegetación de taludes con *Calamagrostis effusa*, el control pasivo de la erosión mediante colchón Reno y la implementación de drenajes para la evacuación segura de filtraciones. Estas medidas permiten que la infraestructura funcione de manera complementaria al ecosistema, aprovechando procesos naturales como la estabilización

vegetal del suelo, la disipación gradual de la energía hidráulica y la retención de sedimentos, en concordancia con los principios de las SbN.

Adicionalmente, la alternativa seleccionada presenta ventajas frente a soluciones de mayor escala o de carácter rígido, al requerir menores movimientos de tierra, evitar interferencias con infraestructuras existentes y adaptarse a la geomorfología del terreno. Este enfoque reduce el riesgo de procesos erosivos, la alteración del drenaje natural y la fragmentación del paisaje, aspectos críticos en áreas de alta sensibilidad ambiental como los páramos.

En términos productivos y de gestión del recurso hídrico, el pequeño embalse contribuye a mejorar la eficiencia del riego y a incrementar la resiliencia del sistema agrícola frente a la variabilidad climática, especialmente durante periodos de déficit hídrico. De esta manera, la propuesta evidencia que la implementación de SbN no solo genera beneficios ambientales, sino que también constituye una estrategia viable para fortalecer la sostenibilidad de actividades productivas de pequeña escala en contextos rurales.

Desde la perspectiva económica, el proyecto presenta una inversión total estimada de \$323.233.311 COP y una vida útil de 20 años, requiriendo aproximadamente \$16,16 millones anuales en beneficios para alcanzar una relación beneficio/costo cercano a la unidad. Estudios previos sobre pequeños embalses reportan relaciones B/C entre 1,3 y 2,5, considerándose viables cuando este indicador es mayor a uno (Payen et al., 2012); (Owusu, 2022). En este sentido, el proyecto puede considerarse económicamente factible, en tanto contribuye a evitar pérdidas productivas durante periodos de estiaje (Arturo et al., 2008), aspecto clave en sistemas agrícolas con alta dependencia hídrica. Asimismo, (Lozano et al., n.d.) señalan que los

embalses constituyen una herramienta esencial para la regulación hídrica cuando la oferta es inferior a la demanda, siendo el análisis de rentabilidad un componente fundamental en la proyección de obras hidráulicas, especialmente en contextos rurales de limitada disponibilidad de capital.

Finalmente, los resultados obtenidos son coherentes con el marco normativo colombiano, en particular con lo establecido en la Ley 1930 de 2018, que promueve intervenciones en páramos basadas en criterios ecosistémicos y sostenibles. En este sentido, el prediseño del pequeño embalse se configura como una solución híbrida —infraestructura gris integrada con procesos naturales— que demuestra la viabilidad técnica, ambiental y productiva de las Soluciones Basadas en la Naturaleza aplicadas a la gestión del recurso hídrico en ecosistemas estratégicos.

7. Conclusiones

El prediseño del pequeño embalse permitió garantizar una capacidad de almacenamiento total de 4 601,65 m³, de los cuales 4 527,4 m³ corresponden al volumen útil, valor determinado mediante el método de la curva de masa inversa. Este volumen resulta suficiente para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo de cebolla de rama a lo largo del año agrícola, considerando una superficie cultivada de 55 873 m², lo que confirma la adecuación del dimensionamiento propuesto.

El análisis del balance hídrico mensual evidenció un comportamiento variable en la relación entre la precipitación efectiva, la evapotranspiración del cultivo (ETc) y la demanda de riego. Se identificó que los meses de enero, febrero y marzo presentan los mayores déficits hídricos,

situación reflejada en la gráfica del balance mensual. Estos resultados justifican plenamente la necesidad de contar con una infraestructura de regulación y almacenamiento que permita garantizar la disponibilidad de agua durante los periodos críticos de escasez.

La dosis neta de riego fue determinada a partir de las características físicas del suelo, la profundidad efectiva del sistema radicular del cultivo (0,45 m) y los coeficientes culturales de la cebolla de rama. Como resultado, se estableció una frecuencia de riego con intervalos máximos entre 4 y 11 días, dependiendo de la época del año, valores que se ajustan adecuadamente al sistema de riego por aspersión empleado en el predio (Apéndice B.2).

Desde el punto de vista estructural, el pequeño embalse fue concebido con una sección trapezoidal de base cuadrada y taludes con inclinación 2:1, utilizando material del suelo *in situ*. Para garantizar su estabilidad frente a condiciones de saturación hídrica, se incorporó un dren tipo pie y se implementaron medidas de control de erosión, como la cobertura vegetal con pajonales de *Calamagrostis effusa*. Asimismo, se diseñó una trampa de sedimentos con dimensiones de 1,0 m × 0,5 m × 0,5 m y un orificio de salida de 15 cm, destinada a reducir el ingreso de sedimentos al pequeño embalse y a preservar su capacidad útil a largo plazo.

El prediseño desarrollado cumple con los principios de las Soluciones basadas en la Naturaleza, al integrar criterios técnicos de eficiencia hídrica con procesos ecosistémicos propios del ecosistema de páramo. La captación de agua lluvia y escorrentía superficial, la incorporación de vegetación nativa para la estabilización de taludes y la implementación de obras pasivas de control de erosión contribuyen a reducir la presión sobre las Notas hídricas naturales y a minimizar

el impacto ambiental de la infraestructura. En este sentido, el pequeño embalse se configura como una solución híbrida que combina infraestructura gris y verde, orientada a mejorar la resiliencia del sistema productivo agrícola y a conservar la funcionalidad ambiental del páramo, en coherencia con la normativa ambiental vigente y los enfoques actuales de sostenibilidad y gestión integrada del recurso hídrico.

Finalmente, el prediseño garantiza la disponibilidad de agua para riego durante los periodos de siembra y producción, lo que representa una mejora en la eficiencia en el uso del recurso hídrico. La altura final del pequeño embalse, definida en 2,5 m, permitió optimizar los costos operativos y constructivos, dado que el costo total de la obra es proporcional a la altura del dique. Esta reducción en la altura contribuye, además, a disminuir los impactos ambientales asociados y a reducir los costos de bombeo, al evitar la extracción directa de agua de Notas hídricas cercanas durante los periodos de estiaje.

8. Recomendaciones

A partir de los resultados y conclusiones del presente estudio, se formulan las siguientes recomendaciones para la optimización del riego y la gestión del pequeño embalse:

Se recomienda que el riego se realice siguiendo los intervalos y tiempos de aplicación establecidos en el Apéndice B.2 para cada mes. Esta práctica contribuirá a una optimización significativa del uso del agua y a maximizar la eficiencia del riego en el predio.

Considerando que según Naranjo (2025) “el propietario dispone de catorce aspersores” y carece de equipo óptimo para cubrir adecuadamente toda la zona de riego, se sugiere la

implementación de un sistema de riego por turnos. Específicamente, se recomienda regar dos parcelas simultáneamente, ya que la cantidad de aspersores disponibles es suficiente para abastecerlas eficazmente, manteniendo una separación de 3.5 metros entre cada aspersor.

Realizar un seguimiento periódico al comportamiento hidráulico del pequeño embalse, especialmente durante los meses de mayor déficit hídrico, para validar el cumplimiento de la oferta calculada y realizar ajustes operativos en caso de ser necesario.

Ejecutar un mantenimiento semestral de la trampa de sedimentos, asegurando la limpieza del canal y el orificio de salida, para evitar obstrucciones que comprometan la capacidad operativa del pequeño embalse. Establecer un plan de manejo de la cubierta de pasto pajonales de *Calamagrostis effusa*, que incluya monitoreo de su crecimiento, podas periódicas y reposición si se presentan áreas descubiertas, con el fin de garantizar su eficacia en el control de la erosión superficial.

Complementar el sistema con la instalación de un medidor de nivel o limnígrafo artesanal, que permita llevar registro continuo del volumen almacenado, optimizando la programación de los riegos en función de las condiciones reales del pequeño embalse.

Para futuras ampliaciones o mejoras, se recomienda realizar un análisis económico detallado del sistema, considerando posibles incrementos en el área cultivada, variaciones en las condiciones climáticas o cambios en los patrones de consumo hídrico.

9. Referencias

- Aguilar, M. , R. W. , & C. M. (2018). *Restauración Ecológica de los Páramos de Colombia: Transformación y herramientas para su transformación*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Allen, R. (1998, January). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements- FAO Irrigation and drainage paper 56. *FAO*.
- Alvarez, W. (2022). *DISEÑO DE UN EMBALSE CON FINES DE RIEGO, PARA UNA FINCA EN EL SECTOR YAMBANANGA, DE LA PARROQUIA PURUNUMA, DEL CANTÓN GONZANAMÁ, DE LA PROVINCIA DE LOJA*. Universidad Nacional de Loja.
- Annette, C. (2011). *ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR ESCURRIMIENTOS NATURALES EN SITIOS NO AFORADOS DE UNA CUENCA HIDROLÓGICA INSTRUMENTADA*. CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.
- Arenas, M. (2005). *ESTABLECIMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE SUELOS CAFETEROS DE SANTANDER*. Universidad Industrial de Santander.
- Bustamante, C. (2008). Universidad Técnica Estatal de Quevedo Universidad Técnica Estatal de Quevedo. *Universidad Técnica Estatal de Quevedo*.
- Carrazón, J. (2007). *Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego* (FAO, Vol. 1).
- Chaparro, D. (2016, August 22). 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*.

Construdata. (2025).

Cruz, J. (2015). *Manejo eficiente del riego en el cultivo de la caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca* (Cenicaña).

Cunia, L. (2005). *Diseño hidráulico y estructural de la Bocatoma del proyecto de irrigación avisado – Valle “La Conquista.”* Universidad Nacional de San Martín.

Dal-Re, R. (2003). PEQUEÑOS EMBALSES DE USO AGRICOLA. In *Mundi-Prensa* (Mundi-Prensa, Vol. 1, Number 0).

Díaz, A. (2017, December). Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG. *Universidad Del Norte*, 35.

Doorenbos y Pruitt. (1992). *Guidelines for predicting crop water requirements* (FAO).

Galindo, J. (2024). *Cebolla de rama (Allium fistulosum L.) Manual de recomendaciones técnicas para su cultivo en el departamento de Cundinamarca*.

Gómez, V. (2022). *Evaluación del comportamiento de la evapotranspiración en una unidad hidrográfica no intervenida de ecosistema de páramo*. Universidad Industrial de Santander.

Invias. (2009). *Manual de Drenaje para carreteras*.

INVIAS. (2019). *Invias*.

Lozano, G., García, P. L., & Monsalve, E. A. (n.d.). *CRITERIOS Y CONSIDERACIONES EN ESTUDIOS DE VIABILIDAD DE EMBALSES CRITERIA AND CONSIDERATIONS IN FEASIBILITY STUDIES OF RESERVOIRS*.

MinAmbiente. (2004). *RESOLUCION 865*.

MinAmbiente. (2018). *INFORME DE GESTIÓN (MINAMBIENTE)*.

- Molina, L. (1989). *Métodos para calcular capacidades de embalse*.
- Muñoz, H. (1997). *Obras hidráulicas rurales* (UniValle).
- Naranjo, J. (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.
- Núñez, A. (2015). Manual de cálculo de eficiencia para sistemas de riego. *DGIAR*.
- Owusu, S. (2022, April 30). The Significance of Small Reservoirs in Sustaining Agricultural Landscapes in Dry Areas of West Africa: A Review. *Roohollah Noori*.
- Payen, J., Faurès, J.-M., & Vallée, D. (2012). *Small reservoirs and water storage for smallholder farming The case for a new approach*.
- Peralta, G. (2019). *Determinación de la capacidad de embalse de la represa Ite - Provincia de Jorge Basadre Tacna-Perú mediante el uso del software Weap*. UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS.
- Pérez, G. (2017). *UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS*.
- Pietro, D. P. (n.d.). *Research study and new evaluation method for pre-filled mattresses as erosion protection systems of berthing structures against jet propeller actions*.
- QGIS Project. (2022). *QGIS Desktop 3.16 User Guide* (Sutton Tim, Jacolin Yves, & Lanstorp Jacob, Eds.).
- Quiñones, A. (2022). *Manual para la Preinversión en proyectos de riego en pequeña escala* (UPRA, Ed.).
- Remenieras, G. (1974). *Tratado de Hidrología Aplicada* (2nd ed.).

Restrepo, J. (2008). PLAN INTEGRAL DE MANEJO DEL DISTRITO DE MANEJO INTEGRADO DE LOS RECURSOS NATURALES “PÁRAMO DE BERLÍN” . *CMDB*.

Rodríguez, C. (2016). *Análisis de la disponibilidad de agua verde a partir del ajuste del cálculo de la evapotranspiración en zonas de vegetación natural*. Universidad Nacional de Colombia.

Rojas, H. (1996). Aspectos Básicos del Riego. *Corpoica, 1*, 35–35.

Sembramos. (2025).

Stormwater partners. (2021, November 4).

Terra, R. (2011). *MANUAL DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PEQUEÑAS PRESAS* (MVOTMA, Vol. 1).

Vásquez, A. , C. V. (2012). *Buenas prácticas para la gestión de los páramos Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú* (P. Cresto & T. Rodríguez, Eds.; CONDESAN, Vol. 0).

Vivanco, E. (2017). *DISEÑO DE LA CAPACIDAD DE UN EMBALSE DE AGUA CON FINES DE RIEGO, EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CUCULA*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA.

Wambeke, J. (2013). *CAPTACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA*. *FAO*.