

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis previa a la obtención de título de
Ingeniero Civil.

AUTOR: Diego Sebastian Cevallos Solorzano

TUTOR: Ing. Samuel Chavez

**Diseño de un sistema de riego presurizado supra foliar
con emisores de alta eficiencia (turbinados) en el
recinto San Miguel de Briceño, provincia de Manabí**

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Diego Sebastian Cevallos Solorzano declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

A handwritten signature in black ink, reading "Diego Cevallos", with a stylized flourish underneath.

Diego Sebastian Cevallos Solorzano

AUTOR

AUTORIZACIÓN DE DERECHOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Yo, Diego Sebastian Cevallos Solorzano en calidad de autor/es del trabajo de investigación titulado Diseño de un sistema de riego presurizado Supra foliar con emisores de alta eficiencia (turbinados) en el recinto San Miguel de Briseño provincia de Manabí, autorizo a la Universidad Internacional del Ecuador (UIDE) para hacer uso de los contenidos que me/nos pertenecen o parte de los contenidos de esta obra, con fines estrictamente académicos o de investigación. Cedo los derechos que como autor/es me/nos corresponden, de acuerdo con lo establecido en los artículos 5, 6, 8, 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento en Ecuador



Diego Sebastian Cevallos Solorzano

AUTOR

APROBACIÓN DEL TUTOR

Yo, Samuel Francisco Chávez Romero, certifico que conozco al autor del presente trabajo de titulación denominado Diseño de un sistema de riego presurizado Supra foliar con emisores de alta eficiencia (turbinados) en el recinto San Miguel de Briceño provincia de Manabí, Diego Sebastian Cevallos Solorzano, siendo el responsable exclusivo tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Samuel F. Chávez Romero', with a horizontal line drawn through the middle of the signature.

Samuel Francisco Chávez Romero
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DEDICATORIA

Dedico este logro a mis padres, Diego y Flor, por el apoyo incondicional en todo momento, y por demostrarme su gran amor y ganas de verme salir adelante siempre.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por ser mi amigo fiel y acompañarme en los buenos y malos momentos y ser mi luz en toda esta etapa de mi vida.

A mis padres por en todo momento darme la mano a través de esta etapa universitaria.

A mi hermana por convivir conmigo en gran parte de esta etapa.

A mis amigos Yahir, Mharjy, Jeremy, Marcelo, Daniel, Emily, Salome por brindarme su amistad sincera y genuina en todos estos años.

A Karol, por ser la que estuvo incondicionalmente en todo momento para mí en esta etapa.

A mis mascotas, Dasha, Whitey, Willy, Thomas, Yoki, Jessie por siempre demostrarme su amor.

A mi director de tesis, Ing. Samuel Chávez, por aceptar mi proyecto y guiarme a través de esta tesis, por compartir sus conocimientos y brindarme su amistad.

Al Ing. Alberto Icaza, por brindarme su amistad y ayuda en todo momento, por compartir sus experiencias y conocimientos que fueron de gran ayuda.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA.....	I
AUTORIZACIÓN DE DERECHOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL.....	II
APROBACIÓN DEL TUTOR	III
ACUERDO DE CONFIDENCIALIDAD	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTO	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
RESUMEN.....	XIV
ABSTRACT.....	XV
CAPÍTULO 1.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 ANTECEDENTES.....	1
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.4 OBJETIVO GENERAL	3
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.6 JUSTIFICACIÓN	3
1.6.1 Justificación teórica	4
1.6.2 Justificación metodológica	4
1.7 HIPÓTESIS.....	5
1.8 DELIMITACIÓN.....	5
1.8.1 Delimitación temporal	5
1.8.2 Delimitación geográfica	5
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	6
2.1 RIEGO	6
2.1.1 Sistema de riego	6
2.1.2 Dotación de riego	6
2.1.3 Lámina de riego.....	6
2.1.4 Turno de riego	6
2.2 TIPOS DE SISTEMAS DE RIEGO	6
2.2.1 Riego por aspersión	6
2.2.2 Por goteo.....	6
2.3 COMPONENTES DE SISTEMA DE RIEGO.....	6
2.3.1 Bomba de agua	6
2.3.2 Aspersores	6

2.3.3	Tubería	6
2.3.4	Válvulas de aire	7
2.3.5	Válvula check (Válvula de retención)	7
2.3.6	Filtro	7
2.3.7	Programador de riego	7
2.3.8	Torres de aspersión	7
2.4	TIPOS DE RESERVORIOS	7
2.4.1	Reservorio	7
2.5	CONCEPTOS HIDRÁULICOS	8
2.5.1	Captación de agua	8
2.5.2	Eficiencia de riego	8
2.5.3	Caudal	8
2.5.4	Presión	8
2.5.5	Pérdidas de carga	8
2.5.6	Tuberías	8
2.5.7	Conducción	8
2.5.8	Propiedades Físicas del Fluido	8
2.6	ECUACIONES	9
2.6.1	Ecuación de Continuidad y Conservación de la Masa	9
2.6.2	Balance de Energía (Ecuación de Bernoulli).....	9
2.6.3	Pérdidas de Energía por Fricción y Accesorios	9
2.7	CARACTERIZACIÓN HIDRO FÍSICA DEL SUELO	10
2.7.1	Evapotranspiración del Cultivo (ETc)	11
2.8	COMPONENTES DE UN SISTEMA DE RIEGO POR ASPERSIÓN	11
2.8.1	Emisores turbinados.....	11
2.8.2	Red de distribución (Tuberías de PVC y PEAD).....	11
2.8.3	Control y Filtrado	11
2.8.4	Infraestructura de almacenamiento.....	12
2.8.5	Diseño Geométrico y Capacidad.....	12
2.8.6	Impermeabilización con Geomembrana.....	12
2.9	FENÓMENOS HIDRÁULICOS CRÍTICOS	12
2.9.1	El Golpe de Ariete	12
2.9.2	Cavitación.....	12
2.9.3	Flujo Turbulento	12
2.9.4	Flujo Laminar.....	13
2.9.5	Número de Reynolds.....	13

2.9.6	Presión hidrostática.....	13
2.9.7	Sedimentación.....	13
2.9.8	Presión dinámica.....	13
2.10	PROPIEDADES OPERATIVAS DEL SISTEMA DE ASPERSIÓN	14
2.10.1	Componentes técnicos.....	14
2.11	ASPERSOR NODOLINI S-45	14
2.11.1	Características de diseño.....	15
2.11.2	Ventajas operativas.....	15
2.11.3	Boquillas del aspersor	16
2.12	NODOLINI S-60.....	16
2.12.1	Capacidad de flujo y alcance	16
2.12.2	Características de diseño.....	16
2.12.3	Ventajas operativas.....	17
2.12.4	Tamaño de boquillas	17
2.12.5	Aplicaciones de emisores.....	18
2.13	HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA EL DISEÑO HIDRÁULICO	19
2.13.1	Implementación de WaterCad en el diseño del sistema	19
2.14	OTRAS HERRAMIENTAS COMPLEMENTARIAS.....	19
2.15	TOPOGRAFÍA	21
2.15.1	Levantamiento topográfico en el diseño de sistemas de riego presurizado.....	21
2.15.2	Conceptos básicos de topografía.....	21
2.15.3	Métodos de levantamiento topográfico	22
2.15.4	Drones en el levantamiento topográfico.....	22
2.15.5	Métodos tradicionales y metodología con dron.....	22
2.15.6	Densidad y calidad de los datos.....	23
2.16	UNIDADES DE BOMBEO.....	23
2.16.1	Curva de la bomba	24
2.17	NORMATIVAS	25
2.17.1	Marco normativo para riego agrícola en Ecuador	26
2.18	RELACIÓN AGUA – SUELO – PLANTA (CULTIVO).....	27
2.19	SELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL TIPO DE SISTEMA DE RIEGO.....	28
CAPÍTULO 3. PROCESAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS		30
3.1	APLICACIÓN TÉCNICA	30
3.1.1	Aplicación en campo	30
3.1.2	Aplicación en oficina.....	30
3.2	DISEÑO HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE RIEGO.....	31

3.2.1	Selección de boquilla de aspersor	31
3.2.2	Determinación del caudal de diseño	31
3.3	SELECCIÓN DEL DIÁMETRO DE TUBERÍA	32
3.3.1	Tubería madre	32
3.3.2	Tubería secundaria	33
3.4	DISEÑO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN HIDRÁULICA	34
3.4.1	Longitud de tuberías.....	36
3.4.2	Lista de accesorios.....	36
3.5	RESERVORIO	36
3.5.1	Determinación de la demanda Hídrica	36
3.5.2	Consumo del sistema.....	37
3.5.3	Distribución de torres de aspersión y cobertura de riego	37
3.5.4	Lámina de riego horaria	37
3.5.5	Cuantificación del consumo volumétrico por superficie total.....	38
3.5.6	Programación del tiempo de aspersión y ciclos operativos	38
3.5.7	Demanda mensual de riego	39
3.5.8	Cuantificación de volúmenes	39
3.5.9	Dimensionamiento del reservorio.....	40
3.6	SELECCIÓN DE BOMBA	41
3.6.1	Pérdidas por fricción.....	41
3.6.2	Pérdidas por accesorios.....	42
3.6.3	Pérdidas totales.....	43
3.6.4	Altura dinámica del sistema	43
3.6.5	Selección técnica del equipo de bombeo	44
3.7	CONTROL Y SEGURIDAD HIDRÁULICA	45
3.7.1	Válvulas de aire.....	45
3.7.2	Válvulas check	45
3.7.3	Bloques de anclaje	45
3.8	ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE DISEÑO	46
3.8.1	Modelados (Epanet).....	46
3.8.2	Evaluación comparativa	53
3.8.3	Presupuesto	54
	CONCLUSIONES	55
	RECOMENDACIONES.....	57
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
	ANEXO A.....	1

ANEXO B.....	3
--------------	---

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. ASPERSOR NODOLINI S-45.....	15
TABLA 2. NODOLINI S-60	17
TABLA 3. MARCO NORMATIVO EN ECUADOR	26
TABLA 4 COMPARATIVA DE RIEGO	29
TABLA 5. ESPECIFICACIÓN TÉCNICA S-45	31
TABLA 6. DIÁMETRO DE TUBERÍA PRINCIPAL.....	33
TABLA 7. DIÁMETRO TUBERÍA SECUNDARIA.....	34
TABLA 8. LONGITUDES DE TUBERÍA	36
TABLA 9. ELEMENTOS DEL SISTEMA.....	36
TABLA 10 EVAPORACIÓN TOTAL	40
TABLA 11. PÉRDIDAS POR ACCESORIOS TUBERÍA PRINCIPAL	42
TABLA 12. PÉRDIDAS POR ACCESORIOS TUBERÍA SECUNDARIA.....	43
TABLA 13. ALTURA DINÁMICA DEL SISTEMA.....	43
TABLA 14 PERFIL DE PRESIONES (14 HA).....	48
TABLA 15 PERFIL ELEVACIÓN (14HA).....	49
TABLA 16 PERFIL DE PRESIONES (7 HA).....	51
TABLA 17 PERFIL DE ELEVACIÓN (7 HA).....	52
TABLA 18 CÁLCULO DE BOMBA.....	53
TABLA 19 ALTERNATIVAS DE DISEÑO	53
TABLA 20 PRESUPUESTO COMPARATIVO	54
TABLA 21 DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL PRESUPUESTO	54

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	5
FIGURA 2 RED HIDRÁULICA	35
FIGURA 3 MODELO HIDRÁULICO 14 HECTÁREAS.....	47
FIGURA 4 PERFIL DE PRESIONES 14 HECTÁREAS	48
FIGURA 5 PERFIL LONGITUDINAL 14 HECTÁREAS.....	49
FIGURA 6 MODELO HIDRÁULICO 7 HECTÁREAS	50
FIGURA 7 PERFIL DE PRESIONES 7 HECTÁREAS	51
FIGURA 8 PERFIL LONGITUDINAL 7 HECTÁREAS.....	52

RESUMEN

En el cantón Briceño, provincia de Manabí, la producción agrícola enfrenta una problemática significativa debido a la dependencia exclusiva de la temporada de lluvias para la siembra. De la mayoría de cultivos solo un pequeño porcentaje de los agricultores cuenta con un sistema de riego, mientras que el gran porcentaje restante depende completamente de las precipitaciones estacionales. Esta limitación impide la diversificación y continuidad de la producción, permitiendo únicamente una cosecha anual lo cual deriva significativamente los ingresos de los productores y los hace vulnerables a la variabilidad climática.

Por otro lado, los pocos sistemas de riego existentes presentan deficiencias en su diseño hidráulico, generando un alto desperdicio de agua y un uso inadecuado de la infraestructura de conducción disponible. Ante esta situación, se propone el diseño de un sistema de almacenamiento y riego presurizado supra foliar con emisores de alta eficiencia en el recinto San Miguel de Briceño, sistema el cual funciona con presiones determinadas con caudales dictaminados por los aspersores turbinados.

Como parte del diseño, es necesario determinar las condiciones topográficas del terreno y los requerimientos hídricos de los cultivos de pasto y maíz, lo que permitirá evaluar la viabilidad del sistema y definir la capacidad del almacenamiento de agua y las características de la red de distribución. El diseño hidráulico incluirá la selección de emisores (aspersores), tuberías (diámetro y material) y tipos de válvulas requeridos para garantizar un uso eficiente del recurso hídrico, evitando pérdidas por evaporación, infiltración excesiva y falta de uniformidad en la aplicación del riego.

Como resultado, este proyecto permitirá optimizar el uso del agua en el sector agrícola, aumentando la productividad de los cultivos, reduciendo la vulnerabilidad ante una carencia de agua, y promoviendo un manejo sostenible del recurso.

PALABRAS CLAVE: Riego presurizado, Eficiencia Hídrica, Aspersores turbinados, Sistema supra foliar, Uniformidad de riego, Infraestructura hidráulica.

ABSTRACT

The agricultural land of Briceño, Manabí, is affected by a critical structural constraint: an almost absolute reliance on seasonal pluvial cycles for crop cultivation. Despite the regional importance of the sector, only a marginal fraction of landholders possesses functional irrigation infrastructure, leaving the vast majority tethered to unpredictable rainfall patterns. This operational bottleneck not only stifles crop diversification and productive continuity restricting yields to a single annual harvest—but also exacerbates the economic fragility of local producers facing intensified climate volatility. Furthermore, the few extant irrigation systems are plagued by hydraulic design flaws and operational inefficiencies, culminating in suboptimal water distribution and substantial resource wastage.

In response to this systemic shortfall, this study delineates the design and technical deployment of a pressurized overhead irrigation and storage system, utilizing high-efficiency sprinklers within the San Miguel de Briceño precinct. Grounded in rigorous civil engineering methodologies, the research integrates a comprehensive topographical assessment alongside the specific hydric demands of grass and maize crops to calibrate storage volumes and distribution networks. The hydraulic synthesis prioritizes the optimization of pipe diameters and valve selection to mitigate evaporative and infiltrative losses. From a structural standpoint, the project ensures the integrity of the reservoir through precise fluid mechanics and volumetric calculations. Ultimately, the execution of these civil works ranging from excavation to infrastructure assembly—aims to institutionalize a sustainable water management paradigm, catalyzing both agricultural productivity and regional economic resilience.

KEYWORDS: Pressurized Irrigation, Water Efficiency, Turbine Sprinklers, Above-canopy System, Irrigation Uniformity, Hydraulic Infrastructure.

CAPÍTULO 1

1.1 Introducción

En el recinto San Miguel de Briceño, cantón San Vicente, provincia de Manabí, la producción agrícola enfrenta una limitación importante derivada de su total dependencia de la temporada de lluvias. La mayoría de los agricultores solo logra una cosecha anual de cultivos como maíz y pasto, lo que reduce sus ingresos y los hace altamente vulnerables a la variabilidad climática. Además, los pocos sistemas de riego existentes presentan deficiencias en su diseño hidráulico, generando alto desperdicio de agua y baja uniformidad en la aplicación.

Este problema es especialmente relevante en una zona con marcada estacionalidad de precipitaciones, donde la falta de riego eficiente impide la diversificación productiva y el uso óptimo del recurso hídrico, afectando la economía familiar y la sostenibilidad agrícola local.

El presente trabajo de titulación contribuye al diseñar un sistema de riego por aspersión presurizado con emisores turbinados (sistema supra foliar). Para ello se realizará el levantamiento topográfico del área, se calcularán los requerimientos hídricos de los cultivos, los caudales de aspersores y bomba, el dimensionamiento de tuberías y las presiones necesarias para lograr una eficiente lámina de riego. De esta forma se busca optimizar el uso del agua, aumentar la productividad y reducir la vulnerabilidad de los productores ante la escasez hídrica.

1.2 Antecedentes

En las últimas décadas, el riego por aspersión se ha consolidado como una de las técnicas más utilizadas en la agricultura moderna para optimizar el uso del agua y aumentar la productividad en zonas con estacionalidad de lluvias. Diversos estudios han demostrado que los sistemas presurizados con emisores de alta eficiencia permiten mejorar la uniformidad de aplicación, reducir pérdidas por evaporación y escorrentía, y adaptarse mejor a las condiciones topográficas y edafológicas de cada terreno. En regiones como la provincia de Manabí, donde la dependencia de las precipitaciones limita la producción agrícola a una cosecha anual, la implementación de sistemas de riego tecnificados representa una alternativa clave para mitigar la vulnerabilidad climática y promover un manejo sostenible del recurso hídrico.

Una investigación, enfocada en modelos de gran escala, demostró que los aspersores turbinados ofrecen una distribución hidráulica más controlada y mayor precisión y estabilidad bajo presiones cambiantes. Para el proyecto de San Miguel de Briceño, este

antecedente es un pilar, ya que la elección de un aspersor turbinado asegura una cobertura homogénea en la zona a irrigar (Ge et al., 2020).

Un diseño adecuado de un sistema de riego no debe basarse en la entrega de agua, sino en una tasa de infiltración del suelo. Es importante señalar como desventaja que el diseño no considere la tasa de infiltración del suelo puede resultar ineficiente, advirtiendo así que sistemas son mal proyectados por una baja capacidad de absorción del suelo.

Un estudio técnico enfocado en el desempeño hidráulico y distribución en sistemas de riego con aspersores se enfoca en el Coeficiente de Uniformidad de Christiansen, obteniendo valores superiores al 80% tras la optimización de las presiones de trabajo.

Adicionalmente, Caisa (2004) demuestra que la eficiencia del sistema no es dependiente únicamente de la tecnología del aspersor, sino de un buen traslape y las presiones de los nodos en la red. Este antecedente es vinculante, ya que nos proporciona una perspectiva comparativa para un bien diseño presurizado cumpla alto estándares de eficiencia hídrica para la zona a irrigar (César et al., 2004).

Se propone una revisión sobre nuevas tecnologías en el riego por aspersión, resaltando que las condiciones climáticas reducen en gran manera las pérdidas hídricas (disminución de presión que experimenta un fluido mientras circula por el circuito), una solución frente a la falta de agua en la agricultura convencional, lo que justifica la inversión en una infraestructura presurizada y con aspersores (Chen et al., 2024).

1.3 Planteamiento del problema

A nivel global, la agricultura consume el 70% de agua dulce del Ecuador. Según el Banco Central del Ecuador, hay varios factores desfavorables, incluyendo la falta de revisión técnica, que representan una barrera para el crecimiento del agro. Esto desencadena estancamientos en producción debido a la dependencia de ciclos climáticos cada vez más difícil de predecir.

En la provincia de Manabí, este problema alcanza niveles alarmantes. Al comparar las estadísticas de la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (s.f.), hay una brecha grande, en donde apenas 45.716 hectáreas cuentan con riego, representando al 9% del total de la superficie productiva.

Esto hace vulnerable a la provincia y por lo tanto al Ecuador, esto se confirma con el reciente boletín de predicción climática del INAMHI, que nos advierte de varios periodos de

déficit hídrico, de acuerdo al INAMHI, concretamente en los meses de febrero y abril, meses los cuales históricamente no deberían tener este problema (INAMHI, s.f.)

Esta crisis climática está relacionada 100% al recinto de San Miguel de Briceño, donde existe una falta de infraestructura hídrica, lo cual limita una producción agrícola. La ausencia de un diseño de ingeniería civil que involucre almacenamiento y distribución correcta del agua, esto obliga a los productores a no depender de del cambiante clima, esta situación genera un efecto dominó, dejando sin alimentos al país.

1.4 Objetivo General

Diseñar un sistema de riego por aspersión mediante emisores turbinados en el recinto de San Miguel de Briceño, cantón San Vicente, provincia de Manabí.

1.5 Objetivos Específicos

- Realizar el levantamiento topográfico del área de estudio para determinar puntos de referencia en el terreno, y proporcionar la geometría del trazado de tubería y colocación de torres de aspersión.
- Calcular los requerimientos hídricos, que incluye caudales (aspersores y bomba), tamaño de tubería y la presión requerida por los aspersores turbinados para satisfacer la lámina de riego.
- Dimensionar la unidad de bombeo calculando la altura dinámica del sistema, considerando perdidas por fricción y accesorios para una correcta selección de bomba que corresponda al caudal y presión necesarios para un eficiente funcionamiento de los aspersores.
- Elaborar un presupuesto referencial e informe técnico del sistema de riego, aplicando un análisis de precios unitarios para determinar una viabilidad económica y futura ejecución de la infraestructura hídrica.

1.6 Justificación

El presente diseño se justifica tanto desde el punto de vista teórico como metodológico. Teóricamente, se fundamenta en estándares de precisión y eficiencia hídrica mediante el uso de herramientas topográficas avanzadas y la simulación de traslapes de emisores turbinados, permitiendo validar la uniformidad de riego y contribuir a mitigar los efectos del cambio climático en la productividad agrícola de Manabí.

Metodológicamente, combina principios de la ingeniería civil como el balance hídrico, la ecuación de Hazen-Williams para pérdidas de carga y el análisis topográfico con tecnología de alta precisión. Esta aproximación garantiza un sistema técnico, viable y sostenible que optimiza el uso del agua en una zona con alto déficit hídrico.

1.6.1 Justificación teórica

La metodología que se usará en este diseño seguirá un enfoque fundamentado en estándares de alta precisión. El uso de herramientas de precisión como drones topográficos asegura que los resultados sean técnica y económicamente viables.

Además, esta metodología simula los traslapes de los emisores turbinados, una fase esencial para validar el coeficiente de uniformidad de Christensen. Este proceso es vital para cambiar las estadísticas macroeconómicas del Banco Central del Ecuador el cual identifica a los cambios climáticos como barreras productivas, transformar esto en una solución de la ingeniería civil tangible, proporcionando esto a una de las zonas con mayor déficit hídrico en el país sería una solución sostenible (*Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos*, s. f.)

1.6.2 Justificación metodológica

Para un sistema de riego, se emplean varias ramas de la ingeniería civil. Se aplicará el método del balance hídrico para determinar la demanda real, usando datos hidrológicos como la precipitación y evo transpiración obtenidos del INAMHI.

Para el cálculo de la red de conducción, se utilizan procedimientos basados en la ecuación de Hazen-Williams, así logrando que las pérdidas por fricción no comprometan el funcionamiento correcto de los emisores turbinados. Aplicaremos también la superposición de diagramas de aspersión para comprobar traslapes correctos y así garantizar una correcta distribución del agua, siguiendo los criterios de Cesar (César et al., 2004).

En cuanto a la metodología se aplicará una topografía con puntos de referencia usando herramientas de alta tecnología topográfica. En esta etapa, se tabularán los datos de precipitación y temperaturas obtenidos en el Boletín del INAMHI y los registros históricos de la zona. Se emplearán hojas de cálculo para determinar las pérdidas de carga por fricción según el material de la tubería con su debido coeficiente de rugosidad.

Se procesarán las presiones en las torres de aspersión más desfavorables permitiendo una selección técnica de la unidad de bombeo que proporcione energía a los desniveles y

perdidas por accesorio. El trazado de la tubería va acompañado por la topografía obteniendo un archivo CAD con medidas, tubería, radios de aspersión y caudales.

1.7 Hipótesis

El diseño de un sistema de riego por aspersión mediante emisores turbinados permitirá el avance para más producción agrícola en el Recinto San Miguel de Briseño, proporcionando disponibilidad de forraje para periodos durante el déficit hídrico proyectado por el INAMHI.

1.8 Delimitación

1.8.1 Delimitación temporal

Este estudio se delimita hidrológicamente considerando las proyecciones climáticas del INAMHI y los registros estadísticos de la ESPAC, asegurando que el diseño responda a las condiciones de estiaje actuales y futuras a este plazo.

1.8.2 Delimitación geográfica

El presente diseño se localiza en la República del Ecuador, provincia de Manabí, cantón San Vicente. El área de intervención específica corresponde al recinto de San Miguel. La finca presenta una topografía irregular característica de esta zona abarcando una superficie de 14 ha destinadas a cultivos o ganadería.



Figura 1. Delimitación del área de estudio

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Riego

2.1.1 Sistema de riego

Infraestructura tecnológica encargada de proveer el recurso hídrico de manera eficiente (Innovatione, 2019).

2.1.2 Dotación de riego

Cantidad de agua por unidad de área en un periodo de tiempo.

2.1.3 Lámina de riego

Cantidad de agua que se aplica a un suelo para satisfacer las necesidades hídricas de un cultivo.

2.1.4 Turno de riego

Intervalo de tiempo entre aplicaciones sucesivas de agua en un cultivo.

2.2 Tipos de sistemas de riego

2.2.1 Riego por aspersión

Método que distribuye el agua en forma de lluvia artificial mediante dispositivos mecánicos (aspersores).

2.2.2 Por goteo

Sistema que aplica el agua de forma localizada y lenta, directamente a la raíz de la planta, optimizando el recurso hídrico.

2.3 Componentes de sistema de riego

2.3.1 Bomba de agua

Equipo hidráulico que proporciona energía, permitiendo un movimiento desde una reserva (pozo, río, reservorio) hacia el sistema de riego, generando así el caudal y la presión para su distribución.

2.3.2 Aspersores

Dispositivos de salida que distribuyen agua en forma de lluvia artificial, aplicando una distribución uniforme sobre el área del cultivo.

2.3.3 Tubería

Conjunto de conductos que transportan el fluido dentro de un sistema, desde la fuente de agua hasta los emisores(aspersores), manteniendo el flujo bajo presión.

2.3.4 Válvulas de aire

Dispositivos que permiten la entrada y salida de aire en las tuberías, previniendo problemas como:

- Vacíos (colapso de tubería)
- Golpe de ariete

Así manteniendo un funcionamiento correcto y seguro en el sistema.

2.3.5 Válvula check (Válvula de retención)

Válvula que permite el paso del agua en un solo sentido, evitando el flujo inverso que puede contaminar la fuente o dañar equipos (bomba).

2.3.6 Filtro

Elemento que elimina partículas sólidas en el agua(sedimentos), previniendo la obstrucción de tuberías y aspersores.

2.3.7 Programador de riego

Equipo que automatiza el riego, controlando la frecuencia y tiempos según las necesidades del cultivo.

2.3.8 Torres de aspersión

Puntos estratégicos donde se colocan los emisores (aspersores), torre hecha en hormigón con la tubería por dentro.

2.4 Tipos de reservorios

2.4.1 Reservorio

Estructura hidráulica destinada al almacenamiento de agua, con el fin de asegurar su disponibilidad y asegurar un suministro continuo para el sistema de riego.

- Reservorios excavados: contruidos directamente en el suelo mediante excavación.
- Reservorios elevados: Estructura sobre el nivel del terreno que permiten distribución por gravedad.
- Reservorios apoyados: Contruidos a nivel del suelo, generalmente de hormigón.
- Revestidos: Con geomembrana y hormigón para evitar filtraciones.
- No revestidos: Permite infiltración, menor costo, pero menor eficiencia.

2.5 Conceptos hidráulicos

2.5.1 Captación de agua

Proceso de recolección de agua desde una fuente natural (rio, lluvia) mediante estructuras diseñadas para proporcionar cantidad y calidad de la misma.

2.5.2 Eficiencia de riego

Relación entre el agua aprovechada por el cultivo y el agua total aplicada, expresada en porcentaje.

2.5.3 Caudal

Volumen de agua que fluye por unidad de tiempo a través de una sección, generalmente expresado en $\frac{L}{s}$ o m^3 .

2.5.4 Presión

Fuerza que ejerce el agua sobre las paredes de las tuberías, necesaria para un correcto funcionamiento de los emisores(aspersores).

2.5.5 Pérdidas de carga

Son las disminuciones de energía del agua mientras circula, causadas por fricción en tuberías y accesorios.

2.5.6 Tuberías

La hidráulica de tuberías es la rama de la mecánica de fluidos que analiza el comportamiento del agua en conductos cerrados. En un sistema de riego, el objetivo es transportar el recurso desde una fuente (reservorio) hasta el emisor (aspersor) con la presión residual necesaria.

2.5.7 Conducción

Proceso de transporte del agua desde la fuente(reservorio), hasta los puntos de distribución (Torres de aspersión), mediante estructuras como tuberías o canales.

2.5.8 Propiedades Físicas del Fluido

El agua, como fluido incompresible, posee propiedades que afectan el diseño:

- **Densidad y Peso Específico:** La fuerza gravitacional sobre la masa de agua define la presión estática.

- Viscosidad: Es la resistencia interna al flujo. La viscosidad cinemática varía con la temperatura, lo que afecta el Número de Reynolds y, por ende, las pérdidas de energía.

2.6 Ecuaciones

2.6.1 Ecuación de Continuidad y Conservación de la Masa

En un sistema de tuberías, el caudal (Q) que entra en una sección debe ser igual al que sale, a menos que existan derivaciones. Se define como: $Q = A * V$;

- A: Área transversal de la tubería
- V: Velocidad media.

En ingeniería de riego, se recomienda que la velocidad no supere los 2.0 m/s para evitar el desgaste prematuro de las paredes internas y minimizar el riesgo de transitorios hidráulicos. (Padua Materiales, s. f.)

2.6.2 Balance de Energía (Ecuación de Bernoulli)

La energía total en cualquier punto de la red se compone de tres cargas:

1. Carga de Elevación (z): Energía potencial respecto a un nivel de referencia.
2. Carga de Presión (P/y): Presión interna ejercida por el fluido.
3. Carga de Velocidad ($v^2/2g$): Energía cinética del flujo. En sistemas reales, la energía en el punto B es siempre menor que en el punto A debido a las pérdidas de carga (hf).

$$\frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

2.6.3 Pérdidas de Energía por Fricción y Accesorios

Las pérdidas de carga son la disipación de energía debida a la viscosidad y la rugosidad del material. (Asto & Pereda, 2018)vb

Fórmula de Hazen-Williams: Es la más empleada en riego por su eficiencia computacional.

$$h = 10.674 \frac{Q^{1.852}}{C^{1.852} * D^{4.871}} * L \quad (2)$$

Donde:

- Q = Caudal
- C = Coeficiente de rugosidad
- D = Diámetro interno (m)
- L = Longitud (m)
- H = Perdidas (m)

Fórmula de Darcy-Weisbach: Es la ecuación universal. Relaciona la pérdida de energía con el factor de fricción (f), la longitud y el diámetro. El factor (f) se determina mediante la ecuación de Colebrook-White o el Diagrama de Moody. (Darcy-Weisbach, s. f.)

$$hf = f \frac{LV^2}{D2g} \quad (3)$$

Donde:

- hf = Pérdida de carga de energía por fricción.
- F = Coeficiente de perdidas
- L = Longitud de la tubería (m)
- V = Velocidad media de flujo (m/s)
- D = Diámetro de la tubería (mm)
- G = Masa gravitacional (m/s)

Pérdidas Menores: Ocurren en codos, válvulas y reducciones. Se calculan mediante el coeficiente de resistencia (K).

2.7 Caracterización hidro física del suelo

El suelo actúa como un almacén de agua. Sus límites son:

- Saturación: Cuando todos los espacios porosos están llenos de agua (ausencia de aire).
- Capacidad de Campo (CC): Cantidad de agua que el suelo retiene tras drenar el exceso por gravedad. Es el límite superior de agua disponible.

- Punto de Marchitez Permanente (PMP): Límite inferior donde la planta ya no tiene fuerza de succión suficiente para extraer agua.
- Agua Útil (AU): La diferencia entre CC y PMP.

2.7.1 Evapotranspiración del Cultivo (ETc)

Es el proceso combinado de evaporación desde el suelo y transpiración desde la planta.

- ETo (Evapotranspiración de Referencia): Calculada mediante el método de Penman-Monteith (FAO), basado en datos de temperatura, viento y radiación.
- Kc (Coeficiente de Cultivo): Factor de ajuste según el tipo de planta y su edad

$$ETc = Eto * Kc \quad (4)$$

2.8 Componentes de un sistema de riego por aspersión

2.8.1 Emisores turbinados

Dispositivo que utiliza la presión del agua para proporcionar movimiento a una turbina integrada dentro del mismo.

- Mecanismo de Rotación: Utilizan una microturbina interna y engranajes para girar. Esto garantiza una velocidad de rotación constante independientemente de la presión, logrando una pluviometría más uniforme.
- Radio de Alcance y Traslape: Para garantizar que no queden zonas secas, los aspersores deben instalarse con un traslape (superposición) que suele ser del 50% al 60% de su diámetro de alcance.

2.8.2 Red de distribución (Tuberías de PVC y PEAD)

- PVC (Policloruro de Vinilo): Resistente y económico, ideal para líneas principales enterradas.
- PEAD (Polietileno de Alta Densidad): Flexible y resistente a la intemperie, ideal para laterales que se mueven o terrenos con pendientes pronunciadas.

2.8.3 Control y Filtrado

Es el conjunto de elementos que regulan y limpian el agua:

- Filtros de Anillas/Malla: Retienen sedimentos para evitar la obstrucción de los emisores.

- Válvulas Reguladoras de Presión: Mantienen la presión constante en los laterales de riego.
- Válvulas Ventosas: Cruciales para expulsar bolsas de aire que pueden causar errores de medición o roturas.

2.8.4 Infraestructura de almacenamiento

En regiones como Manabí, el reservorio permite independizar el riego de la disponibilidad inmediata de la fuente.

2.8.5 Diseño Geométrico y Capacidad

El volumen se calcula con base en la demanda máxima del cultivo y el tiempo de reserva deseado. Se deben considerar los taludes (inclinación de las paredes) para garantizar la estabilidad del suelo.

2.8.6 Impermeabilización con Geomembrana

El uso de geomembranas de HDPE (Polietileno de Alta Densidad) es el estándar técnico.

- Resistencia UV: Al estar expuestas al sol, deben tener aditivos para no cristalizarse.
- Espesor: Generalmente se usan calibres de 1.0 mm a 1.5 mm dependiendo de la profundidad y el tipo de suelo.

2.9 Fenómenos hidráulicos críticos

2.9.1 El Golpe de Ariete

El golpe de ariete es un fenómeno hidráulico que se manifiesta a través de los cambios excesivos de presión cuando la velocidad de un fluido se ve alterada debido a la manipulación o falla de los dispositivos hidráulicos (válvulas, bombas, etc.) (Twyman, 2018).

2.9.2 Cavitación

Formación de bolsas y burbujas de vapor en un medio líquido inicialmente homogéneo (Pomero & Bonneau, s. f.).

2.9.3 Flujo Turbulento

El flujo turbulento es aquel movimiento de un fluido que se caracteriza por ser desordenado y fluctuante. A diferencia de un flujo lineal, aquí las partículas chocan y se mezclan constantemente, creando remolinos que hacen que el trayecto sea imposible de predecir con exactitud (Ramos, 2023).

2.9.4 Flujo Laminar

Movimiento ordenado de un fluido donde sus partículas se desplazan en capas paralelas perfectamente definidas. En este estado, no hay mezcla entre las capas ni perturbaciones, permitiendo que el fluido se deslice con suavidad y siguiendo rutas totalmente predecibles (Ramos, 2023).

2.9.5 Número de Reynolds

Indicador matemático que predice si un flujo será suave o caótico. Se calcula multiplicando la velocidad por el tamaño del sistema y dividiendo el resultado por la viscosidad. Básicamente, nos dice si las fuerzas del movimiento ganan la batalla contra la resistencia del fluido, definiendo así el tipo de trayectoria que seguirá (Reynolds, s. f.).

2.9.6 Presión hidrostática

Peso que un fluido ejerce sobre un cuerpo sumergido. Su valor depende de tres factores principales: que tan profundo está el objeto, que tan denso es el líquido y la fuerza de gravedad del lugar. A mayor profundidad, hay más líquido encima, lo que resulta en una presión más fuerte y predecible (Valdivielso, 2020).

Su ecuación es:

$$p = r * g * h \quad (5)$$

Donde:

- P = Presión hidrostática
- R = Densidad del fluido
- H = Altura de la superficie del fluido
- g = Gravedad

2.9.7 Sedimentación

Es el asentamiento de partículas sólidas en el fondo de un cuerpo de agua. Gracias a la fuerza de gravedad, los materiales más densos que el líquido dejan de flotar y se depositan abajo, permitiendo separar los sólidos del agua de forma natural (Brian, 2019).

2.9.8 Presión dinámica

Es la presión generada por la velocidad de un fluido. Refleja la fuerza que el flujo es capaz de ejercer debido a su masa y rapidez, siendo un concepto fundamental para entender

como se transfiere la energía en corrientes de aire o agua cuando golpean un objeto o pasan por una tubería (Presión Dinámica, s. f.).

2.10 Propiedades operativas del sistema de aspersión

Los aspersores a usar son de procedencia italiana de la marca Nodolini, específicamente dos modelos; S-45 y S-60. Cada uno de ellos cumple con ciertas especificaciones técnicas para lograr el desempeño propuesto por el fabricante.

2.10.1 Componentes técnicos

2.10.1.1 Turbina

El motor del aspersor. A diferencia de los aspersores que usan un martillo que golpea el chorro, este usa una turbina interna accionada por el paso del agua. Esto permite un giro constante, suave y sin las vibraciones que suelen aflojar los soportes o tuberías.

2.10.1.2 Tornillo de ajuste

Sirven para calibrar la velocidad de rotación y la sensibilidad de los mecanismos. Permiten que el usuario adapte el aspersor según la presión de agua disponible en la finca.

2.10.1.3 Leva

Es una pieza mecánica que transforma el movimiento de la turbina en el cambio de dirección. Es lo que permite que el aspersor gire hacia un lado y, al llegar al tope, regrese automáticamente para cubrir el sector deseado.

2.10.1.4 Jet breaker

Es la pieza que entra y sale del chorro principal.

- Jet-breaker connected (Conectado): La pieza interfiere el chorro para pulverizar el agua, creando una lluvia fina que cae cerca del aspersor.
- Jet-breaker disconnected (Desconectado): La pieza se retira para dejar que el chorro salga con toda su fuerza y alcance la máxima distancia posible.

2.10.1.5 Boquilla secundaria

Es un pequeño orificio adicional situado debajo de la boquilla principal. Su función es regar el área inmediata al aspersor (el radio corto). Sin esta boquilla, el aspersor lanzaría el agua muy lejos, pero dejaría la zona cercana al poste totalmente seca.

2.11 Aspersor Nodolini S-45

El modelo S45 es un aspersor de media capacidad diseñado para ofrecer un riego de alta precisión.

Este modelo usa una conexión de 1" 1/2.

Tabla 1. Aspersor Nodolini S-45

Boquilla (mm)	Presión (atm)	Caudal (l/min)	Radio (m)
14	2,0	183	24
14	3,0	224	27
14	4,0	258	31
16	2,0	239	26
16	3,0	292	30
16	4,0	338	33
18	3,0	370	32
18	4,0	427	35
18	5,0	477	38
20	3,0	456	34
20	4,0	527	38
20	5,0	589	41
22	4,0	638	41
22	5,0	713	43
22	6,0	780	45
24	4,0	730	42
24	5,0	817	45
24	6,0	895	47

Fuente: Nodolini S45 Irrigation Sprinklers

2.11.1 Características de diseño

- **Angulo de Trayectoria:** Cuenta con una inclinación de 25 grados, ideal para maximizar el alcance y resistir los efectos del viento moderado.
- **Sistema de Propulsión:** Funciona mediante una turbina interna, lo que garantiza que no existan vibraciones durante su uso y prolonga la vida útil de los componentes.
- **Tubo de Lanzamiento:** Su diseño es cónico para optimizar el paso del agua y mantener un chorro compacto y potente.

2.11.2 Ventajas operativas

- **Mecanismo Protegido:** Al tener todas las partes mecánicas en el interior, no sufre daños por suciedad externa o contacto con el agua.

- Rompe chorros Dinámico: Incluye un dispositivo ajustable que permite fragmentar el chorro de agua para asegurar que la lluvia sea uniforme, incluso cerca del aspersor.
- Adaptabilidad en Pendientes: Es capaz de trabajar en terrenos con mucha inclinación y bajo condiciones de alta presión sin perder estabilidad.

2.11.3 Boquillas del aspersor

El equipo permite el intercambio de boquillas para ajustarse a las necesidades del cultivo, siendo los diámetros compatibles: 14 mm, 16 mm, 18 mm, 20 mm, 22 mm y 24 mm.

2.12 Nodolini S-60

El modelo S60 es un aspersor de gran alcance y alto rendimiento, diseñado para coberturas extensas. A continuación, se detallan sus características operativas y constructivas principales:

2.12.1 Capacidad de flujo y alcance

- Caudal: Posee un rango de operación que va desde los 281 litros por minuto (con boquilla de 16 mm a 3.0 atm) hasta los 1164 litros por minuto (con boquilla de 28 mm a 5.5 atm).
- Radio de Riego: Su diseño le permite cubrir distancias de entre 35 y 54 metros de radio, lo que lo posiciona como un equipo de largo alcance.
- Conexión: Esta disponible con brida o rosca hembra de 2 pulgadas (2") o 2 pulgadas y media (2 1/2"), dependiendo de la configuración necesaria.

2.12.2 Características de diseño

- Ángulo de Trayectoria: Su inclinación estándar de 25 grados asegura una proyección eficiente del chorro, optimizando la distribución del agua incluso en condiciones de viento.
- Sistema de Propulsión por Turbina: Utiliza una turbina interna que elimina las vibraciones y el golpe de martillo, protegiendo la integridad de la estructura de soporte.
- Tubo de Lanzamiento Cónico: Este diseño especial mejora el rendimiento hidráulico, permitiendo que el chorro mantenga su cohesión por más distancia.

2.12.3 Ventajas operativas

- Funcionamiento en Pendientes: Su mecanismo interno sin freno le permite trabajar con total precisión en terrenos con desniveles pronunciados.
- Uniformidad Superior: Gracias al rompe chorros dinámicos (jetbreaker) de interferencia ajustable, el S60 logra una pulverización fina y una distribución de "lluvia" homogénea en toda el área de aplicación.

2.12.4 Tamaño de boquillas

Este modelo ofrece una amplia variedad mediante el uso de boquillas intercambiables de los siguientes diámetros: 16 mm, 18 mm, 20 mm, 22 mm, 24 mm, 26 mm y 28 mm

Tabla de aspersor Nodolini s-60

Tabla 2. Nodolini S-60

Boquilla (mm)	Presión (atm)	Caudal (l/min)	Radio (m)
16	3,0	281	35
16	3,5	303	37
16	4,0	324	39
18	3,0	355	37
18	3,5	383	39
18	4,0	410	41
20	4,0	506	41
20	4,5	537	43
20	5,0	566	45
22	4,0	612	43
22	4,5	649	45
24	4,0	729	45
24	4,5	774	47
24	5,0	816	49
26	4,5	908	47
26	5,0	957	49
26	5,5	1004	51
28	4,5	1053	50
28	5,0	1110	52
28	5,5	1164	54

Fuente: Nodolini S-60

2.12.5 Aplicaciones de emisores

Los emisores turbinados mantienen una velocidad de rotación constante independientemente de fluctuaciones moderadas de presión, lo que garantiza una distribución homogénea del agua incluso en terrenos con pendientes irregulares. Asimismo, es ampliamente aceptado que la integración de un reservorio de almacenamiento permite independizar el riego de la disponibilidad inmediata de fuentes superficiales o subterráneas, convirtiéndose en una estrategia clave para enfrentar periodos de déficit hídrico.

Se conoce también que el éxito del diseño depende de tres variables interrelacionadas: la topografía del terreno, los requerimientos hídricos del cultivo y la hidráulica de la red de distribución. El uso de software especializado permite simular el comportamiento completo del sistema antes de su construcción, minimizando errores en la selección de diámetros de tubería, ubicación de torres de aspersión y dimensionamiento de la unidad de bombeo (Ge et al., 2020).

El presente trabajo se inserta dentro de la línea de investigación de diseño de sistemas de riego tecnificados en regiones semiáridas y subhúmedas de América Latina. Mientras que estudios previos se han centrado principalmente en la evaluación de eficiencia de aspersores en condiciones controladas de laboratorio o en parcelas experimentales de gran escala, este proyecto aplica esos principios a una escala real de 12 hectáreas en el recinto San Miguel de Briseño, incorporando simultáneamente almacenamiento, red presurizada y cultivos locales (maíz y pasto).

A diferencia de investigaciones anteriores que analizan de forma aislada la uniformidad de riego o las pérdidas de carga, el presente estudio integra de manera holística el levantamiento topográfico con drones, el cálculo de requerimientos hídricos específicos para los cultivos de la zona y el modelado hidráulico completo de la red. De esta forma, complementa los avances teóricos existentes y los adapta a las condiciones edafoclimáticas particulares de la provincia de Manabí, donde la topografía irregular y la variabilidad pluviométrica representan un desafío adicional.

La mayoría de los estudios realizados en Ecuador se han enfocado en riego por goteo o en sistemas de riego superficial, dejando un espacio técnico sin cubrir en cuanto a la implementación de riego presurizado por aspersión en cultivos extensivos como maíz y pasto en Manabí.

Un vacío detectable es la escasa integración de herramientas de modelado hidráulico avanzado (como WaterCAD) con levantamientos topográficos de alta resolución en proyectos de titulación a nivel de pregrado. La mayoría de los trabajos previos realizan cálculos manuales o simplificados, sin validar el comportamiento dinámico completo de la red bajo diferentes escenarios de operación.

2.13 Herramientas computacionales para el diseño hidráulico

2.13.1 Implementación de WaterCad en el diseño del sistema

La integración de WaterCAD en el proceso de diseño permite realizar un modelado hidráulico completo y preciso de la red de distribución presurizada. Este software especializado de Bentley System utiliza el método del gradiente de hidráulicos (GHM) para resolver simultáneamente las ecuaciones de continuidad y energía en todos los nodos y tuberías del sistema.

Una vez importados los datos topográficos del levantamiento con drones y las características técnicas de los aspersores Nodolini S-45 y S-60 (caudales y presiones de operación extraídos de las tablas del fabricante), WaterCAD genera automáticamente los perfiles de presión y velocidad a lo largo de toda la red.

El software también permite simular diferentes escenarios operativos: funcionamiento de una sola torre, grupos de torres simultáneas y condiciones de máxima demanda. De esta manera se garantiza que las pérdidas de carga por fricción y accesorios no comprometan el funcionamiento correcto de los emisores turbinados. Los resultados del modelo sirven directamente como base para la selección técnica de la electrobomba, el dimensionamiento del reservorio y la elaboración del trazado definitivo en archivo CAD.

Esta metodología computacional eleva significativamente la precisión del diseño, reduce el riesgo de sobredimensionamiento o sub dimensionamiento de componentes y proporciona un respaldo técnico sólido para la futura ejecución de la obra (*WaterCAD: The Premier Hydraulic Analysis and Design Software for Water Distribution Systems - CTTEC*, s. f.).

2.14 Otras herramientas complementarias

AutoCAD Civil 3D es el software líder en ingeniería civil para el procesamiento de levantamientos topográficos y el diseño geométrico de redes hidráulicas. En el presente proyecto, permite importar nubes de puntos obtenidas con drones topográficos y generar un Modelo Digital de Terreno (MDT o superficie TIN) con alta resolución. Este modelo se utiliza para:

- Determinar elevaciones exactas en cada punto de la red de distribución y ubicar las torres de aspersión en los puntos más favorables.
- Calcular desniveles (cargas de elevación) que influyen directamente en las pérdidas de carga totales y en la presión residual en cada aspersor turbinado.
- Generar perfiles longitudinales y secciones transversales de las tuberías, optimizando el trazado para minimizar longitudes y desniveles excesivos.
- Crear el plano de implantación definitivo (archivo .dwg) que incluye el trazado de tuberías ubicación de torres de aspersión, reservorio y accesorios.

La integración con WaterCAD es directa: Civil 3D exporta el trazado geométrico y las elevaciones de nodos hacia WaterCAD mediante archivos .dwg o .xml, permitiendo que el modelo hidráulico incorpore automáticamente las cargas de elevación reales del terreno irregular de San Miguel. Esta vinculación evita errores manuales y asegura que las pérdidas por fricción (calculadas con Hazen-Williams) y las pérdidas menores se combinen correctamente con las cargas estáticas del terreno.

Microsoft Excel constituye una herramienta fundamental para los cálculos hidráulicos preliminares y de verificación. Su versatilidad permite programar fórmulas personalizadas y macros VBA que automatizan procesos repetitivos. En este diseño se emplea principalmente para:

- Realizar el balance hídrico del cultivo (maíz y pasto) utilizando datos del INAMHI (precipitación, evapotranspiración de referencia ET_o y coeficiente de cultivo K_c). La ecuación base es:

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad (6)$$

Donde ET_c es la evotranspiración del cultivo y se compara con la precipitación efectiva para determinar la lámina neta de riego.

La ventaja de Excel radica en su facilidad para realizar análisis de sensibilidad (variando presión, caudal o rugosidad) y para exportar resultados directamente a WaterCAD o Civil 3D. En proyectos similares de riego por aspersión, el uso combinado de estas tres herramientas (Civil 3D → Excel → WaterCAD) reduce el tiempo de diseño en más del 60 % y minimiza errores de cálculo manual.

AutoCAD Civil 3D aporta la componente geométrica y topográfica crítica para el cálculo de cargas de elevación, mientras que Excel proporciona la flexibilidad para cálculos hidráulicos preliminares y verificaciones rápidas.

2.15 Topografía

2.15.1 Levantamiento topográfico en el diseño de sistemas de riego presurizado

El levantamiento topográfico constituye una fase fundamental en el diseño de cualquier sistema de riego presurizado, ya que permite conocer con precisión la geometría del terreno y sus variaciones altimétricas, variables que influyen directamente en las cargas de elevación, pérdidas de carga y presión residual en cada emisor (Facultad de Ingeniería Civil, s. f.).

2.15.2 Conceptos básicos de topografía

La topografía es la ciencia que se encarga de la descripción y representación gráfica de la forma y características de la superficie terrestre, tanto en su configuración horizontal (planimetría) como vertical (altimetría). Su objetivo principal es determinar las coordenadas tridimensionales (X, Y, Z) de puntos del terreno para generar modelos que sirvan de base al diseño de obras civiles e hidráulicas.

Entre los conceptos fundamentales se destacan:

- Punto topográfico: Elemento básico de referencia con coordenadas planas (X, Y) y altura (Z) respecto a un datum vertical (generalmente el nivel del mar o un punto local arbitrario).
- Elevación o cota: Distancia vertical de un punto respecto a un plano de referencia.
- Desnivel o diferencia de cota: Diferencia de elevación entre dos puntos, determinante para el cálculo de la carga hidrostática y las pérdidas de energía en la red de tuberías.
- Pendiente: Relación entre el desnivel y la distancia horizontal, expresada en porcentaje o como relación 1:n. En sistemas de riego, pendientes mayores al 5 % requieren consideraciones especiales en el trazado de tuberías y ubicación de torres de aspersión.

- Curvas de nivel: Líneas imaginarias que unen puntos de igual elevación. Su equidistancia (intervalo de curva) permite visualizar la forma del terreno y determinar zonas de mayor o menor pendiente.
- Perfil longitudinal: Representación vertical de la superficie del terreno a lo largo de una línea determinada (por ejemplo, el trazado de una tubería principal).
- Sección transversal: Corte perpendicular al eje longitudinal que muestra la forma del terreno en un punto específico.
- Modelo Digital de Terreno (MDT): Representación numérica tridimensional de la superficie del terreno generada a partir de una nube de puntos. Incluye el Modelo Digital de Elevación (MDE) y el Modelo Digital de Superficie (MDS).

Estos conceptos permiten determinar con exactitud los puntos de referencia necesarios para el trazado geométrico de la red de conducción y la ubicación óptima de las torres de aspersión.

2.15.3 Métodos de levantamiento topográfico

Tradicionalmente, los levantamientos se realizaban con instrumentos ópticos o electrónicos como estaciones totales, niveles automáticos y GPS de precisión. Sin embargo, estos métodos resultan laboriosos y de baja productividad en áreas extensas o de acceso difícil.

En la actualidad, el uso de drones ha revolucionado el levantamiento topográfico gracias a su capacidad de cubrir grandes superficies en corto tiempo y con alta resolución espacial.

2.15.4 Drones en el levantamiento topográfico

Un drone o vehículo aéreo no tripulado (UAV) es una aeronave pilotada de forma remota o autónoma, equipada con sensores (cámaras RGB, multiespectrales o LIDAR) que permite adquirir imágenes aéreas de alta resolución para la generación de productos cartográficos.

El proceso se basa en la fotogrametría digital, técnica que consiste en obtener medidas tridimensionales a partir de imágenes superpuestas tomadas desde diferentes ángulos (*Topografía con drones: cómo funciona y qué precisión esperar* | Wingtra, s. f.).

2.15.5 Métodos tradicionales y metodología con dron

Los métodos tradicionales (estación total, GPS rover y nivelación manual) y el mapeo con drones LIDAR tienen fortalezas diferentes, pero el drone LIDAR es claramente superior en

la mayoría de proyectos agrícolas e ingeniería civil de mediana a gran escala, como tu caso de 12 hectáreas en San Miguel de Briseño.

2.15.6 Densidad y calidad de los datos

- Tradicional: Genera solo cientos de puntos discretos. El resto del terreno se obtiene por interpolación (estimaciones), lo que deja brechas importantes.
- Drone: Captura millones de puntos con alta densidad. Puede penetrar vegetación moderada gracias a múltiples retornos láser (hasta 7 retornos) (*The Advantages of Drone Surveying vs. Traditional Methods* | ROCK Robotic | ROCK Robotic, s. f.).

2.16 Unidades de bombeo

La bomba es el corazón del sistema de riego presurizado. Su función principal es suministrar el caudal y la presión necesarios para que los aspersores turbinados operen dentro de su rango óptimo superando las pérdidas de carga por fricción, accesorios y desniveles topográficos.

La unidad de bombeo constituye uno de los componentes más importantes en un sistema de riego presurizado por aspersión, ya que es la encargada de suministrar el caudal y la presión necesarios para que los aspersores turbinados funcionen correctamente dentro de su rango óptimo de operación.

Las bombas más utilizadas en sistemas de riego agrícola como el proyectado para el recinto San Miguel de Briseño son las bombas centrífugas horizontales de una etapa, conocidas también como bombas tipo caracol. Estas bombas son ideales para caudales medios y altos con presiones moderadas, características que se ajustan bien a los requerimientos de los aspersores Nodolini S-45 y S-60. En casos donde se requiera mayor presión debido a desniveles importantes o longitudes extensas de tubería, se pueden emplear bombas centrífugas multietapa.

Cuando no existe suministro eléctrico confiable, es común utilizar motobombas accionadas por motor diésel o gasolina.

La selección correcta de la bomba se basa principalmente en tres parámetros fundamentales: el caudal total requerido, la altura dinámica total del sistema y la potencia necesaria. El caudal total se calcula sumando el consumo de todos los aspersores que funcionarán simultáneamente más un margen de seguridad del 10 al 15 %. La altura dinámica total incluye la carga estática generada por los desniveles topográficos, las

pérdidas de carga por fricción en las tuberías, las pérdidas menores en accesorios y válvulas, y la presión residual mínima requerida en los aspersores.

Es fundamental que el punto de operación de la bomba (combinación de caudal y presión) se encuentre lo más cercano posible al punto de máxima eficiencia de su curva característica, preferiblemente entre el 70 % y el 85 % de eficiencia. Esto permite reducir el consumo energético y prolongar la vida útil del equipo.

Entre las marcas más utilizadas en Ecuador para este tipo de aplicaciones se encuentran Colbombas y Pedrolo. Las bombas Colbombas son reconocidas por su robustez y fácil disponibilidad de repuestos en el país, mientras que las Pedrolo destacan por su eficiencia y diseño compacto.

2.16.1 Curva de la bomba

La curva característica de una bomba, también conocida como curva de rendimiento o curva Q-H, es una representación gráfica que muestra el comportamiento hidráulico de la bomba bajo diferentes condiciones de operación. Esta curva es fundamental para la correcta selección y dimensionamiento de la unidad de bombeo en un sistema de riego presurizado.

La curva característica relaciona principalmente tres variables:

- El caudal (Q), expresado generalmente en metros cúbicos por hora (m^3/h) o litros por segundo (l/s), que representa la cantidad de agua que la bomba es capaz de mover.
- La altura manométrica total (H) o altura dinámica total, expresada en metros de columna de agua (m.c.a.), que indica la presión que la bomba puede generar.
- La eficiencia (η) de la bomba, expresada en porcentaje (%), que muestra qué tan bien convierte la energía eléctrica o mecánica en energía hidráulica útil.

En una curva característica típica de una bomba centrífuga se observan varias líneas:

- La curva Q-H (caudal vs. altura): Muestra cómo disminuye la altura que puede bombear la bomba a medida que aumenta el caudal. Generalmente tiene una forma descendente. Cuando el caudal es cero (bomba cerrada), la altura es máxima; a medida que se abre la válvula y aumenta el caudal, la altura disminuye.
- La curva de eficiencia: Indica el porcentaje de eficiencia en diferentes puntos de caudal. El punto más alto de esta curva representa el punto de mejor eficiencia

(Best Efficiency Point - BEP), que es el punto ideal donde la bomba debe trabajar. Operar cerca de este punto reduce el consumo de energía y el desgaste del equipo.

- La curva de potencia (P): Muestra la potencia requerida por la bomba según el caudal. Normalmente aumenta a medida que crece el caudal.

Para el correcto diseño de un sistema de riego, el punto de operación del sistema (caudal total requerido y altura dinámica total calculada en WaterCAD o Epanet) debe ubicarse lo más cerca posible del punto de mejor eficiencia de la bomba. Si el punto de operación queda muy a la izquierda de la curva (caudal bajo), la bomba trabaja en zona de recirculación y puede sufrir vibraciones y cavitación. Si queda muy a la derecha (caudal excesivo), la bomba opera con baja eficiencia, mayor consumo energético y riesgo de sobrecarga del motor.

2.17 Normativas

En el ámbito del riego agrícola en Ecuador existe un marco normativo importante que regula el uso sostenible del recurso hídrico, la calidad del agua, el diseño de infraestructuras y las buenas prácticas agrícolas. Este marco combina disposiciones constitucionales, leyes orgánicas, reglamentos y normas técnicas específicas.

La Constitución de la República del Ecuador establece en sus artículos 12, 313 y 318 que el agua es patrimonio nacional estratégico de uso público, dominio inalienable e imprescriptible del Estado. Prohíbe su privatización y prioriza su uso para consumo humano y riego, con el fin de garantizar la soberanía alimentaria y el caudal ecológico (MAGP, 2022).

La Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua regula la gestión integral del agua. Establece que la planificación, construcción, operación y mantenimiento de sistemas de riego es responsabilidad compartida entre el Gobierno Central, los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) y las organizaciones de usuarios. Exige autorización estatal para cualquier aprovechamiento de agua con fines productivos (*Asamblea aprobó la Ley de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua | Asamblea Nacional del Ecuador, s. f.*).

El Código Orgánico del Ambiente (COA) y su Reglamento son fundamentales porque regulan la calidad ambiental del recurso agua destinada al riego. Incluyen límites máximos permisibles para parámetros físicos, químicos y microbiológicos en el agua de riego, con el objetivo de proteger la salud humana, los cultivos y el medio ambiente. Entre estos

parámetros destacan límites para metales pesados (arsénico, cadmio, plomo, mercurio), coliformes totales, pH y sólidos disueltos (PILCO ALVAREZ, 2025).

El Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), a través de su Subsecretaría de Riego y Drenaje, impulsa el Plan Nacional de Riego y Drenaje (actualizado para el periodo 2021-2026). Este instrumento de política pública promueve la tecnificación del riego parcelario (aspersión y goteo), el almacenamiento de agua y la eficiencia hídrica, especialmente para pequeños y medianos productores. También fomenta proyectos como el PIT (Proyecto de Irrigación Tecnificada) (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, s. f.).

El Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) emite Normas Técnicas Ecuatorianas (NTE) relacionadas con componentes de sistemas de riego, tuberías, accesorios y calidad de materiales. Aunque no existen normas INEN específicas y detalladas exclusivamente para el diseño completo de sistemas de riego por aspersión, se aplican normas generales de tuberías de PVC, polietileno y accesorios hidráulicos.

A nivel de buenas prácticas, el MAG y Agrocalidad han publicado guías de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) que incluyen capítulos específicos sobre el manejo del agua de riego. Estas recomiendan evaluar la calidad del agua, realizar análisis periódicos, planificar el consumo según el cultivo y evitar el uso de aguas residuales sin tratamiento (Agrocalidad, 2025).

A nivel internacional, Ecuador suele referenciar normas como las de la ISO (por ejemplo, ISO 11545 para uniformidad en pivotes y sistemas de aspersión) y las de la ASABE para evaluación de uniformidad y eficiencia en sistemas de riego por aspersión. Estas sirven de referencia técnica en el diseño y evaluación de proyectos (ISO 11545:2002, s. f.).

2.17.1 Marco normativo para riego agrícola en Ecuador

Tabla 3. Marco normativo en Ecuador

Norma / Instrumento	Año / Actualización	Entidad Emisora	Contenido Principal	Aplicación en tu Proyecto
Constitución de la República del Ecuador	2008	Asamblea Nacional	Agua como patrimonio nacional, uso prioritario para riego y soberanía alimentaria	Base legal general

Ley Orgánica de Recursos Hídricos	2014	Asamblea Nacional	Gestión integral del agua, autorizaciones de uso, derechos de riego	Autorización de captación y uso del agua
Código Orgánico del Ambiente (COA)	2017	Ministerio del Ambiente	Calidad del agua, límites de descarga y protección ambiental	Calidad del agua para riego
Plan Nacional de Riego y Drenaje	2019-2027	Ministerio de Agricultura	Política pública para tecnificación del riego y eficiencia hídrica	Justificación de tecnificación con aspersores
Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) - AGROCALIDAD	Decreto 1449	Agrocalidad - MAG	Manejo del agua de riego, prohibición de aguas servidas, registros	Manejo sostenible y documentación del sistema

Fuente: Cevallos, 2026

2.18 Relación agua – suelo – planta (cultivo)

La relación agua-suelo-planta constituye uno de los fundamentos teóricos más importantes en el diseño de cualquier sistema de riego. Esta interacción determina la cantidad de agua que debe aplicarse, la frecuencia de riego y la eficiencia con la que el cultivo aprovecha el recurso hídrico.

El suelo actúa como un reservorio natural de agua para las plantas. Su capacidad para almacenar y suministrar agua depende de sus propiedades físicas, principalmente de la textura, estructura y materia orgánica (Assan, 2025).

La capacidad de campo es el contenido de agua que permanece en el suelo después de que el exceso de agua ha drenado por gravedad. Representa el límite superior de agua que el suelo puede retener de manera útil. El punto de marchitez permanente es el contenido de agua en el cual las plantas ya no pueden extraer más humedad del suelo,

produciendo marchitez irreversible. Entre estos dos puntos se encuentra el agua útil o agua disponible, que es la porción de agua que las raíces de las plantas pueden absorber efectivamente.

El manejo adecuado del riego busca mantener el contenido de humedad del suelo dentro del rango óptimo de agua útil, evitando tanto el déficit hídrico (estrés de la planta) como el exceso de agua.

En el caso de los cultivos de maíz y pasto en el recinto San Miguel de Briceño, es fundamental determinar con precisión estos parámetros, ya que influyen directamente en el cálculo de la lámina de riego neta y bruta. Una correcta estimación de los requerimientos hídricos permite dimensionar adecuadamente el volumen del reservorio, el caudal de la bomba y la frecuencia de riego, optimizando el uso del agua en una zona caracterizada por marcada estacionalidad de precipitaciones.

El diseño del sistema de riego presurizado supra foliar debe considerar estas relaciones para aplicar la lámina de riego precisa en el momento adecuado, evitando pérdidas por percolación profunda o evaporación excesiva, y garantizando un desarrollo óptimo de los cultivos durante los periodos de déficit hídrico.

2.19 Selección y justificación del tipo de sistema de riego

A pesar de que el riego por goteo destaca formalmente por sus elevados niveles de eficiencia en la aplicación del agua, se determinó su inviabilidad técnica y económica para el proyecto en el Recinto San Miguel de Briceño debido a los siguientes factores críticos:

- *Naturaleza del Cultivo y Demanda de Lavado Foliar:* Los cultivos predominantes y proyectados para la zona de intervención se benefician sustancialmente de la aplicación supra foliar. El riego por aspersión simula la precipitación natural, lo cual no solo hidrata el suelo, sino que limpia el tejido foliar del polvo acumulado durante la época de estiaje prolongado (junio a diciembre) característico de la provincia de Manabí, favoreciendo los procesos fotosintéticos y mitigando la proliferación de plagas específicas de clima seco.
- *Vulnerabilidad a Obturaciones y Calidad de la Fuente Hídrica:* Las fuentes de captación superficiales y subsuperficiales locales presentan fluctuaciones estacionales en su carga de sólidos suspendidos y sedimentos finos. Un sistema por goteo exigiría una infraestructura de filtrado de alta tecnología extremadamente rigurosa y un plan de mantenimiento químico constante (para evitar la precipitación

de sales y el taponamiento). Esto elevaría de manera insostenible los costos operativos para la comunidad de usuarios. En contraste, los emisores turbinados elegidos para el diseño por aspersión poseen un diámetro de boquilla significativamente mayor, garantizando la continuidad operativa del sistema con requerimientos de filtrado mecánico convencionales.

- *Costo de Implantación por Hectárea:* La configuración parcelaria y la topografía del terreno analizado demandarían una densidad kilométrica de tuberías laterales y mangueras de goteo para cubrir las 14 hectáreas del proyecto. El presupuesto de inversión inicial para la adquisición de cintas de goteo, conectores iniciales, válvulas de lavado y equipos de filtración superaba los márgenes financieros viables para el alcance del proyecto, mientras que la solución por aspersión fija optimiza la longitud de la red secundaria (90 mm) y optimiza la inversión mediante el uso estratégico de los puntos de emisión hidrodinámicos calculados.

Tabla 4 Comparativa de riego

Variable técnica	Riego por aspersión	Riego por goteo
Tipo de cobertura	Total(humedece 100% de suelo y follaje)	Localizada(restringida a la base)
Amplitud de cultivo	Cultivos densos y pastizales	Óptimo para frutales u hortalizas en hileras
Diámetro de boquilla	Grandes	Pequeños
Presión operativa	Alta	Baja
Infraestructura	Torres fijas de aspersión	Densidad kilométrica de manguera y cintas

Fuente: Cevallos, 2026

CAPÍTULO 3. PROCESAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se presentarán los resultados obtenidos del cálculo hidráulico y sistema de conducción del sistema de riego, considerando caudales, pérdidas de carga, con base en los parámetros teóricos establecidos.

3.1 Aplicación técnica

3.1.1 Aplicación en campo

Para el desarrollo de la presente investigación se realizaron actividades de campo orientadas a la recopilación de información necesaria para el diseño y análisis del sistema de riego. Estas actividades permitieron obtener datos reales de las condiciones físicas e hidráulicas del terreno de estudio.

En primera instancia, se efectuó un levantamiento topográfico del área del terreno, con el propósito de determinar las dimensiones, pendientes y características geométricas del sitio. La información obtenida permitió elaborar la representación del terreno y establecer parámetros fundamentales para el diseño hidráulico del sistema.

Posteriormente, se realizó una prueba de tasa de infiltración del suelo, con la finalidad de evaluar la capacidad de absorción del agua en el terreno. Este ensayo permitió identificar el comportamiento del suelo frente a la aplicación de agua y establecer criterios para la selección de los tiempos y caudales de riego adecuados.

Finalmente, se efectuó una visita técnica a la fuente de abastecimiento de agua, con el objetivo de verificar la disponibilidad y cantidad de recurso hídrico existente para el funcionamiento del sistema de riego. Durante esta actividad se evaluaron las condiciones generales de la fuente y su capacidad para satisfacer la demanda hídrica requerida por el proyecto.

3.1.2 Aplicación en oficina

La aplicación en oficina comprendió el procesamiento, análisis y desarrollo técnico de la información obtenida durante las actividades de campo, con el propósito de realizar el diseño hidráulico del sistema de riego y verificar su funcionamiento adecuado.

Inicialmente, se efectuó el procesamiento de los datos obtenidos en el levantamiento topográfico, permitiendo generar la representación del terreno, identificar pendientes y establecer las condiciones geométricas necesarias para el diseño de la red hidráulica.

Con base en la información recopilada, se desarrollaron los cálculos hidráulicos correspondientes, considerando caudales de diseño, pérdidas de carga, velocidades de flujo y presiones de operación requeridas para el correcto funcionamiento del sistema.

Asimismo, se realizó el dimensionamiento de tuberías, determinando diámetros adecuados en función de las condiciones hidráulicas y la demanda de agua requerida. De igual manera, se estableció la cantidad de tuberías y accesorios necesarios para la implementación de la red de distribución hidráulica.

3.2 Diseño hidráulico del sistema de riego

Para el diseño del sistema de riego fue necesario determinar el caudal requerido por los aspersores seleccionados, considerando sus características de operación y la demanda hídrica necesaria para garantizar una adecuada distribución del agua en el área de estudio.

3.2.1 Selección de boquilla de aspersor

Con base en las especificaciones técnicas del fabricante, se seleccionó una boquilla de 18 mm de diámetro, trabajando a una presión de 5 atm, debido a que cumplía con los requerimientos hidráulicos del proyecto y garantizaba una adecuada cobertura del área de riego.

Según la tabla de características técnicas, la boquilla seleccionada presenta un caudal de 477 L/min y un alcance de 43 m, parámetros utilizados posteriormente para el diseño hidráulico de la red de distribución.

Tabla 5. Especificación técnica S-45

Boquilla(mm)	Presión(atm)	Consumo(l/min)	Alcance(m)
18	5,0	477	43

Fuente: Cevallos, 2026

3.2.2 Determinación del caudal de diseño

Una vez seleccionado el aspersor y conocido su requerimiento de caudal, se procedió a determinar el caudal total necesario para el funcionamiento del sistema de riego.

Para el diseño del sistema de riego se estableció el funcionamiento simultáneo de dos aspersores, con la finalidad de garantizar una adecuada cobertura del área de estudio y optimizar el tiempo de riego.

La selección de dos aspersores operando al mismo tiempo permitió determinar el caudal total de diseño requerido para la red, así como establecer los parámetros necesarios para

el dimensionamiento de tuberías, cálculo de pérdidas de carga y verificación de presiones de operación.

Calculando así el caudal requerido por los aspersores mediante:

$$Q_t = Q_i * \text{Número de aspersores} \quad (7)$$

- Q_t = Caudal total
- Q_i = Caudal del aspersor

Remplazando los valores:

$$Q_t = 7.95 \left(\frac{L}{s} \right) * 2(\text{aspersores}) = 15.9 \left(\frac{L}{s} \right) \quad (8)$$

Dando como resultado un caudal total entre los dos aspersores de 15.9(L/s) que redondeamos a 16(L/s), correspondiente a el requerimiento hídrico para el funcionamiento simultaneo de los dos aspersores seleccionados.

3.3 Selección del diámetro de tubería

3.3.1 Tubería madre

Una vez determinado el caudal total de diseño del sistema, se procedió a seleccionar el diámetro de la tubería correspondiente a la línea madre, considerando criterios hidráulicos relacionados con pérdidas de carga y velocidad del flujo.

Para la línea principal se utilizó el caudal total calculado de 16 L/s, correspondiente al funcionamiento simultáneo de los dos aspersores seleccionados.

La selección del diámetro de tubería se realizó mediante el análisis de catálogos comerciales hidráulicos (plastigama), evaluando las pérdidas de carga por cada 100 m de tubería y la velocidad de circulación del agua, con la finalidad de garantizar un funcionamiento eficiente del sistema y evitar pérdidas excesivas de presión.

Para la selección de los diámetros de tubería se consideraron criterios hidráulicos relacionados con velocidad del flujo y pérdidas de carga, utilizando la ecuación de Hazen-Williams para el análisis de pérdidas por fricción en tuberías presurizadas.

La expresión implementada es:

$$hf = 10.67 * \frac{L * Q^{1.852}}{C^{1.852} * D^{4.87}} \quad (9)$$

Donde:

- Hf = Pérdidas de carga por fricción (m)
- L = Longitud de tubería (m)
- Q = Caudal (m³/s)
- C = Coeficiente de Hazen-Williams
- D = Diámetro interno de la tubería

A partir de los resultados obtenidos mediante tablas hidráulicas comerciales basadas en la ecuación de Hazen-Williams, se seleccionó el diámetro de tubería que presenta menores pérdidas de carga y velocidades adecuadas de operación.

Tabla 6. Diámetro de tubería principal

D. nominal(mm)	D. nominal(mm)	Tubería(mm)	Tubería(mm)
Caudal	Caudal	160	160
lps	gpm	Pérdida de carga	Velocidad
16,0	253.6	0.43	0.86

Fuente: Cevallos, 2026

La selección de la tubería principal permitió garantizar condiciones hidráulicas adecuadas dentro del sistema de riego, manteniendo pérdidas de carga reducidas y velocidades de circulación aceptables para el correcto funcionamiento de la red.

3.3.2 Tubería secundaria

Para el dimensionamiento de las líneas secundarias se consideró un caudal equivalente al 50 % del caudal principal del sistema, debido a la distribución del flujo hacia cada ramal de riego. En función del caudal principal de 16 L/s, se adoptó un caudal de diseño 8 L/s para las tuberías secundarias.

La selección del diámetro de las tuberías secundarias se realizó mediante el análisis de tablas hidráulicas comerciales basadas en la ecuación de Hazen-Williams, considerando criterios de pérdidas de carga y velocidad del flujo, con la finalidad de garantizar condiciones adecuadas de operación dentro del sistema de riego.

Tabla 7. Diámetro tubería secundaria

D. nominal(mm)	D. nominal(mm)	Tubería(mm)	Tubería(mm)
Caudal	Caudal	90	90
lps	gpm	Pérdida de carga	Velocidad
8,0	126.8	1.96	1.36

Fuente: Cevallos, 2026

Con base en los resultados obtenidos, se seleccionó una tubería de 90 mm de diámetro nominal para las líneas secundarias, debido a que presenta bajas pérdidas de carga y velocidades de circulación adecuadas para el funcionamiento eficiente del sistema hidráulico.

El diámetro seleccionado permite mantener condiciones hidráulicas estables en la distribución del agua, contribuyendo al correcto desempeño de los aspersores y a una adecuada operación de la red de riego.

3.4 Diseño de la red de distribución hidráulica

Una vez definidos los parámetros hidráulicos y seleccionados los diámetros de tubería, se procedió al diseño de la red de distribución del sistema de riego, considerando la geometría del terreno y la cobertura requerida para el área de estudio.

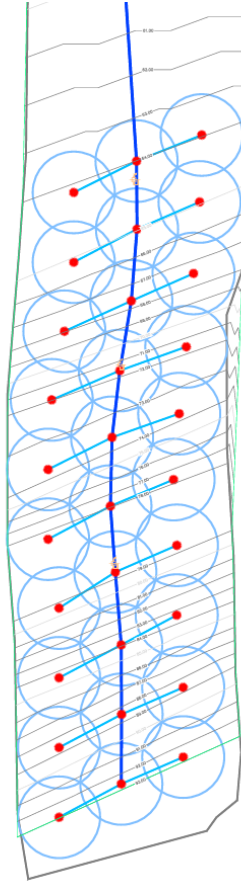


Figura 2 Red hidráulica

Figura 2. Distribución de la red hidráulica y ubicación de torres de aspersión

El diseño de la red de distribución hidráulica se desarrolló considerando las condiciones topográficas del terreno, la disponibilidad hídrica y el área total a irrigar, con el propósito de garantizar una cobertura uniforme y un funcionamiento eficiente del sistema de riego.

La configuración de la red fue establecida a partir de la ubicación estratégica de las líneas principales y secundarias, permitiendo conducir el caudal requerido hacia cada punto de aplicación. Para ello, se consideraron criterios hidráulicos relacionados con presión de operación, pérdidas de carga y velocidades de flujo adecuadas dentro de las tuberías.

La distribución de las torres de aspersión fue definida en función del alcance del chorro proporcionado por los aspersores seleccionados, buscando generar una adecuada superposición de riego y evitar zonas con déficit o exceso de aplicación de agua.

3.4.1 Longitud de tuberías

Tabla 8. Longitudes de tubería

Tipo de tubería	Diámetro(mm)	Longitud(m)
Tubería madre	160	760
Tubería secundaria	90	1450

Fuente: Cevallos, 2026

3.4.2 Lista de accesorios

Tabla 9. Elementos del sistema

Elemento	Cantidad
Codos 90(mm)	30
Torres de aspersión	30
Aspersores	2
Tees 160(mm)	20
Reductor de 160(mm) a 90(mm)	20
Válvula de aire	3
Bridas 160(mm)	1
Buje 160(mm) a 90(mm)	1
Tee 90(mm)	1

Fuente: Cevallos, 2026

La configuración final del sistema permitió definir la ubicación de las líneas hidráulicas, torres de aspersión y demás componentes necesarios para el funcionamiento del sistema, manteniendo condiciones hidráulicas apropiadas en términos de presión, velocidad y pérdidas de carga.

A partir de la distribución planteada, se procedió a determinar las cantidades totales de tubería, accesorios y elementos requeridos para la implementación del sistema de riego.

3.5 Reservorio

3.5.1 Determinación de la demanda Hídrica

Para el dimensionamiento de la infraestructura de almacenamiento (reservorio), se estableció la condición más desfavorable del proyecto: el periodo de estiaje. De acuerdo con registros del INAMHI para la provincia de Manabí, esta fase crítica se extiende por un lapso continuo de 6 meses (entre los meses de julio y diciembre), ciclo en el cual la producción agrícola depende del recurso hídrico debido a la ausencia de precipitaciones.

3.5.2 Consumo del sistema

El sistema de riego contempla un caudal de diseño de $15.9 \frac{l}{s}$, el cual lo asimilamos como $16 \frac{l}{s}$, para el funcionamiento simultaneo de 2 aspersores. Con la finalidad de estandarizar las unidades de flujo, se realizó una conversión de unidades de litros por segundo(L/s) mediante la siguiente ecuación.

$$Q = 16 \frac{L}{s} * \left(\frac{3600 s}{1 h} \right) = 57600 \frac{L}{h} \quad (10)$$

Dado que el diseño modula por ramales individuales donde cada aspersor turbinado Nodolini s-45, demanda un caudal de $8 \frac{L}{s}$ ($28800 \frac{L}{h}$), el reservorio debe responder directamente a este régimen de consumo horario.

3.5.3 Distribución de torres de aspersión y cobertura de riego

La subdivisión parcelaria del proyecto define un área total de estudio y emplazamiento que requiere la instalación estratégica de 30 torres de aspersión fijas. Al contrastar las 14 hectáreas de riego con las 30 torres de aspersión se determinó una densidad equivalente a 2.29 torres/ha.

A partir de esta relación de distribución, se calculó el área de influencia hídrica neta asignada a cada torre de aspersión, utilizando como superficie base la hectárea estándar (10.000m²).

$$\text{Área de irrigación por torre} = \frac{10000m^2}{2.29 \frac{torres}{ha}} = 4375.00 m^2 \quad (11)$$

3.5.4 Lámina de riego horaria

Con el objetivo de validar que la tasa de aplicación no sature el complejo coloidal del suelo arcilloso característico de la zona, se evaluó la lámina de riego horaria real generada por el consumo volumétrico del aspersor distribuido sobre área de cobertura unitaria (4375.00 m²).

Sabiendo que 1m³=1000L

$$\text{Consumo por aspersor} = 28800 \frac{L}{s} \div 1000 = 28.8 m^3 \quad (12)$$

$$\text{Lámina de riego} = \frac{\text{Consumo horario del aspersor (m}^3/\text{h)}}{\text{Área de irrigación por torre(m}^2\text{)}}$$

$$\text{Lámina de riego} = \frac{28.8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{4375.00 \text{ m}^2} = 0.00658 \frac{\text{m}}{\text{h}} \quad (13)$$

$$0.00658 \frac{\text{m}}{\text{h}} * 1000 = 6.58 \frac{\text{mm}}{\text{h}} \quad (14)$$

Desde la perspectiva relación agua-suelo-planta, este valor resulta técnicamente óptimo, ya que se encuentra en el rango admisible de la velocidad de infiltración para suelos arcillosos entre 5 a 15 mm/h sin manifestar problemas.

3.5.5 Cuantificación del consumo volumétrico por superficie total

Para dimensionar la capacidad de transporte y el volumen total de agua en movimiento dentro del área de estudio, se escaló el requerimiento hídrico a la superficie total del área de estudio, establecida en 14 hectáreas. Sabiendo que la tasa de aplicación horaria de agua es 6.58 mm/h equivale a 6.58 L/m² y que una hectárea consta de 10000 m², seguimos la siguiente relación.

$$6.58 \frac{\text{l}}{\text{m}^2} * 10000 \text{ m}^2 = 65800 \text{ L} \quad (15)$$

$$Q_{\text{global}} = 65800 \text{ l} * h * ha * 14ha = 921200 \frac{\text{L}}{\text{h}} \quad (16)$$

Mediante conversión de sistema internacional, este flujo representa un volumen total por hora de 921.20 m³/h, definiendo así nuestra demanda por 14 hectáreas que sirve para justificar la necesidad modular del riego y así dimensionar el reservorio.

3.5.6 Programación del tiempo de aspersión y ciclos operativos

Debido a las limitaciones impuestas por el caudal, la operación del sistema de riego se diseñó de manera fraccionada mediante el uso secuencial de 30 torres de aspersión.

La programación hidráulica establece el funcionamiento simultaneo de 2 aspersores por cada turno de riego, fijando una permanencia de 1 hora por postura.

El tiempo requerido para completar un riego sobre las 14 hectáreas se calcula mediante la relación de torres de aspersión y aspersores activos.

$$Tiempo\ de\ riego\ por\ ciclo = \left(\frac{30\ torres}{2\ aspersores} \right) * \frac{1\ hora}{postura} = 15\ horas \quad (17)$$

Desde un punto de vista de gestión operativa y considerando jornadas laborales de 8 horas diarias, el tiempo real necesario para suministrar agua a toda la superficie se consolida en:

$$Tiempo\ de\ operacion\ total = \frac{15\ horas}{8\ \frac{horas}{jornada}} = 2\ dias \quad (18)$$

3.5.7 Demanda mensual de riego

Se determinó que el cultivo de maíz es el más sembrado en la zona, basándonos en este cultivo que requiere una lámina de riego al mes de 90mm/mes durante época seca.

El tiempo mensual requerido para satisfacer esa lamina de uso la siguiente ecuación.

$$Tiempo\ mensual\ de\ aspersión = \frac{Lamina\ requerida\ por\ el\ cultivo(mm/mes)}{Lamina\ de\ entrega\ del\ aspersor(mm/h)}$$

$$Tiempo\ mensual\ de\ aspersión = \frac{90\ \left(\frac{mm}{mes}\right)}{6.58\ \left(\frac{mm}{h}\right)} = 13.67\ \frac{horas}{mes} \quad (19)$$

Considerando que cada postura de riego se programó a una duración de 1 hora, se estableció que se requieren 14 riegos al mes por cada torre de aspersión.

La validación analítica del aporte del sistema de riego se determinó multiplicando la frecuencia de riego mensual por la tasa de aplicación del aspersor.

$$Lámina\ total\ aplicada = \frac{14\ riegos}{mes} * \frac{6.58mm}{h} = \frac{92.12mm}{mes} \quad (19)$$

3.5.8 Cuantificación de volúmenes

En primera instancia, se determinó el volumen neto con la siguiente ecuación:

$$Volumen\ torre = \frac{28.80m^3}{h} * 15\ torres = 432\ m^3 * dia * 15\ torres \quad (20)$$

A partir de este indicador diario, se cuantificó el requerimiento volumétrico global mensual de riego en el área de estudio, multiplicando el consumo diario por las 30 torres de aspersión del sistema y la cantidad de riegos a la semana (4días) ya que regamos el sistema completo en dos días y se riega 2 veces a la semana.

$$Volumen\ semanal = 432\ \frac{m^3}{dia} * torre * 4\ dias = 1728\ \frac{m^3}{semana} \quad (21)$$

$$Volumen\ mensual = 1728 \frac{m^3}{semana} * 4\ semanas = 6912 \frac{m^3}{mes} \quad (22)$$

3.5.9 Dimensionamiento del reservorio

Sabiendo que existe un estiaje de 6 meses, relacionamos el volumen mensual por las 30 torres de aspersión con la cantidad de meses de sequía.

$$Volumen\ inicial = 6912 \frac{m^3}{mes} * 6\ meses = 41472\ m^3 \quad (23)$$

Este valor representa el volumen de agua necesaria para abastecer 6 meses de sequía, pero en un sistema de riego se debe considerar un factor de seguridad por evaporación, en este caso se recopila los datos de evaporación (*Clima – INAMHI*, s. f.) de la zona por los últimos 5 años para tener valores representativos de evaporación en la zona.

Tabla 10 Evaporación total

Evaporación		
Mes	Valor	Unidad
Julio	93.7	mm
Agosto	110	mm
Septiembre	125	mm
Octubre	105.8	mm
Noviembre	118.5	mm
Diciembre	118	mm
Sumatoria	671	mm/año
Altura Evaporada	0.671	metros

Fuente: Cevallos, 2026

Con la estadística de la evaporación total anual de la zona, multiplicamos el valor de la altura evaporada con el área del reservorio para los 6 meses de estiaje (ecuación 22), considerando 4 metros de profundidad para el diseño del reservorio, luego sumando el volumen de evaporación con el volumen inicial obtenemos el volumen total del reservorio.

$$\text{Área de reservorio} = \frac{41472m^3}{4m} = 10368\ m^2 \quad (24)$$

$$Volumen\ de\ evaporación = 0.671\ m * 10368\ m^2 = 6957\ m^3 \quad (25)$$

$$Volumen\ reservorio = 41472\ m^3 + 6957\ m^3 = 48429\ m^3 \quad (26)$$

3.6 Selección de bomba

3.6.1 Pérdidas por fricción

3.6.1.1 Tubería principal

La línea principal proyectada en material PVC con un diámetro nominal de 160(mm) para conducir un caudal de 16 L/s a lo largo de 760(m). De acuerdo con especificaciones de diseño este tramo opera a 0.86 m/s generando una pérdida de carga unitaria (PC) de 0.43m por cada 100 (m)de tubería.

Se calculó la pérdida con la siguiente ecuación:

$$hf_{principal} = \frac{PC\ principal}{100} * Longitud\ principal$$

$$hf_{principal} = \left(\frac{0.43}{100}\right) * 760m = 3.268m \quad (27)$$

3.6.1.2 Tuberías secundarias

Las líneas secundarias encargadas de distribuir un caudal fraccionado de 8 L/s hacia las torres de aspersión emplean un diámetro nominal de 90(mm) con una longitud acumulada de 1450 (m). El fluido circula a una velocidad de 1.36 m/s lo que da una pérdida de carga unitaria (PC) de 1.96 (m) por cada 100 (m) de conducción.

Un aspecto fundamental en el proyecto radica en las válvulas de control y seccionamiento se localizan en la coronación de cada torre de aspersión, situándose en los extremos de los ramales secundarios. Bajo esta premisa la totalidad de la red de distribución comprendiendo los 760(m) de la tubería madre y los 1450(m) de tubería secundaria permanecen completamente llenos y presurizados antes de dar inicio a cualquier activación de aspersor.

No obstante, las pérdidas de carga por fricción son estrictamente dinámicas; es decir, ocurren en los tramos donde existe movimiento y velocidad de flujo. Quiere decir en las secciones secundarias cuyas llaves de acceso permanezcan cerradas el agua se encuentra en equilibrio.

Consecuentemente, aplicando el criterio de la ruta crítica por turno operativo, el flujo dinámico se restringe al recorrido del ramal secundario activo, el cual posee una longitud

total de 70m hasta la descarga. El factor de desarrollo se establece como 70(m)/100. La pérdida por ramal secundario se determina como:

$$hf_{ramal} = \frac{1.96(m)}{100(m)} * 70 = 1.372(m) \quad (28)$$

Dado que el régimen operativo del sistema dicta el funcionamiento simultaneo de dos líneas secundarias para abastecer las dos torres de aspersión activas del turno, la resistencia friccional dinámica total en las secciones secundarias se consolida duplicando el efecto individual de la siguiente manera:

$$1.372(m) * 2 = 2.744(m) \quad (29)$$

3.6.2 Pérdidas por accesorios

Para evaluar la disipación de energía por accesorios o locales se aplicó el método analítico del coeficiente de perdida local (K):

$$hf_{accesorio} = K * \frac{V^2}{2g} \quad (30)$$

Donde:

- $hf_{accesorio}$: Pérdida de carga localizada (m.c.a)
- K: Coeficiente adimensional de resistencia característico de cada accesorio.
- V: Velocidad media de flujo
- g: Aceleración de gravedad constante (9.81m/s²)

Entonces:

Tabla 11. Pérdidas por accesorios tubería principal

Tubería principal (160mm)				
V	Accesorio	No	KLi	KL
0.86	Válvula check	2	2.5	5
G	Brida	1	0.1	0.1
9.81	Codo 90 grados	1	0.9	0.9
-	Tees	20	0.1	2
-	Reductor	20	0.35	7
-	Válvulas de aire	3	0.5	1.5

-	Σ - KL_principal	16.5
---	-------------------------	------

Fuente: Cevallos, 2026

Sustituyendo la sumatoria acumulada de coeficientes K de tubería principal en la ecuación número (28):

$$hf_{\text{accesorio_principal}} = 16.5 * \frac{0.86^2}{2(9.81)} = 0.6219 \quad (31)$$

Tabla 12. Pérdidas por accesorios tubería secundaria

Tubería secundaria(90mm)				
V	Accesorio	No	KL _i	KL
1.36	Codo 90°	2	0.9	1.8
Σ -				
KL_secundario		1.8		

Fuente: Cevallos, 2026

$$hf_{\text{accesorio_secundario}} = 1.8 * \frac{1.36^2}{2(9.81)} = 0.1696 \quad (32)$$

La pérdida por accesorios total es la sumatoria de la línea principal más la secundaria

$$hf_{\text{accesorios_total}} = 0.6219 + 0.1696 = 0.7916 \quad (33)$$

3.6.3 Pérdidas totales

La pérdida de carga total del sistema representa la resistencia hidrodinámica acumulada que el flujo debe vencer a lo largo de la ruta crítica de conducción desde la obra de captación hasta el aspersor más desfavorable hidráulicamente:

$$hf_{\text{total}} = hf_{\text{principal}} + hf_{\text{ramal}} + hf_{\text{accesorios_total}} \quad (34)$$

Se aplica la ecuación:

$$hf_{\text{total}} = 3.2680 + 2.7740 + 0.7916 = 6.80(m) \quad (35)$$

3.6.4 Altura dinámica del sistema

Tabla 13. Altura dinámica del sistema

Altura dinámica total		
Tabla de resumen		
hf_total	6.80	m

Desnivel Topográfico	35	m
Presión del aspersor	50	m
Altura Dinámica	91.80	m.c.a

Fuente: Cevallos, 2026

3.6.5 Selección técnica del equipo de bombeo

Para garantizar el funcionamiento óptimo de red, es indispensable calcular la potencia del sistema de bombeo requerida para vencer el desnivel topográfico y pérdidas de carga, manteniendo la presión consignada de 50 metros en los emisores. El cálculo se fundamenta en la siguiente ecuación:

$$P_h = \frac{\gamma * Q * H}{75} \quad (36)$$

Donde;

- γ = Densidad del agua (1 kg/ L)
- Q = Caudal de diseño (16 L/s)
- H = Altura dinámica requerida (m)
- 75= Factor de conversión para obtener el resultado en caballos de fuerza (hp)

$$P_h = \frac{1 * 16 * 91.80}{75} = 19.58 \text{ hp} \quad (37)$$

Posteriormente, considerando las pérdidas mecánicas y operativas del equipo, se determina la potencia del motor (P_m), mediante la relación con la eficiencia de la bomba (η), fijada para este proyecto de 70%.

$$P_m = \frac{P_h}{\eta} \quad (38)$$

$$P_m = \frac{19.58}{0.70} = 28 \text{ hp} \quad (39)$$

Se requiere una potencia de 28 caballos de fuerza, comercialmente se buscaría una bomba de 30 o 35 caballos de fuerza para poder proporcionar la energía necesaria al punto mas lejano desde la bomba.

3.7 Control y seguridad hidráulica

3.7.1 Válvulas de aire

La presencia de aire atrapado dentro de las tuberías presurizadas genera obstrucciones al flujo dinámico, altera las lecturas de presión y puede causar sobrepresiones o fenómenos por vacío físico. En base a las longitudes y perfil longitudinal de la tubería madre y sus ramificaciones, se determinó el uso válvulas de aire cada 200(m), en una longitud de 760(m), se usarán 4 válvulas de aire distribuidas estratégicamente.

La ubicación operativa de estas 4 válvulas se detalla a continuación:

- Válvula 1: Posicionada justo después de la unidad de bombeo para purgar bolsas de aire que se forman durante el arranque de la bomba.
- Válvula 2 y 3: Localizada en las inmediaciones de la zona media del trazado longitudinal, protegiendo las deflexiones intermedias de la conducción.
- Válvula 4: Se ubica en el extremo final de la línea madre para asegurar una evacuación del aire residual.

3.7.2 Válvulas check

La inversión de sentido del flujo del agua representa un riesgo que puede causar rotura mecánica irreversible de los componentes internos de la electrobomba debido al giro inverso del impulsor. Para anular esto se posicionan las válvulas de la siguiente manera:

- Ubicación en la succión (antes de la bomba): Se encarga de mantener cebada de forma continua la tubería de succión.
- Ubicación en la impulsión (Después de la bomba): Instalada inmediatamente a la salida de la descarga del motor, posicionada para absorber la onda de presión inversa provocada por cortes de energía, de esta manera asilando mecánicamente la estación de bombeo.

3.7.3 Bloques de anclaje

Debida a la presión hidrodinámica interna se opera una carga de diseño elevada en los cambios de dirección (codos), derivaciones (tees) y reducciones de sección experimentan fuerzas de empuje hidrostático lateral, que tienden a desacoplar las uniones.

Para contrarrestar estos esfuerzos laterales y transmitir las cargas de forma segura, se propone bloques de anclaje de hormigón simple.

3.8 Análisis y evaluación de alternativas de diseño

En este apartado se presentará el comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios de diseño. Para ello, se evalúa el modelado del sistema general correspondiente al área de estudio original, seguido por una alternativa de optimización.

Finalmente, se realiza una contrastación técnica mediante un estudio comparativo que integra variables en tiempo y áreas de cuatro alternativas analizadas.

3.8.1 Modelados (Epanet)

3.8.1.1 Escenario principal de 14 hectáreas

Para establecer la línea base del proyecto, se realizó la simulación hidráulica de la red de distribución cubriendo la totalidad de 14 hectáreas. En (figura 3), se muestra la configuración espacial de la red, detallando los flujos en las líneas de conducción y las presiones dinámicas obtenidas en cada torre de aspersión. Desde el reservorio hasta el punto más lejano el modelo nos da como valor de 51.17 metros de presión con dos aspersores simultáneamente abiertos con un consumo de (8 l/s) cumpliendo así hidráulicamente el diseño, hay que recordar que el aspersor (nodolini s-45), requiere una presión de 50 metros de presión para funcionar a su eficiencia óptima de diseño.

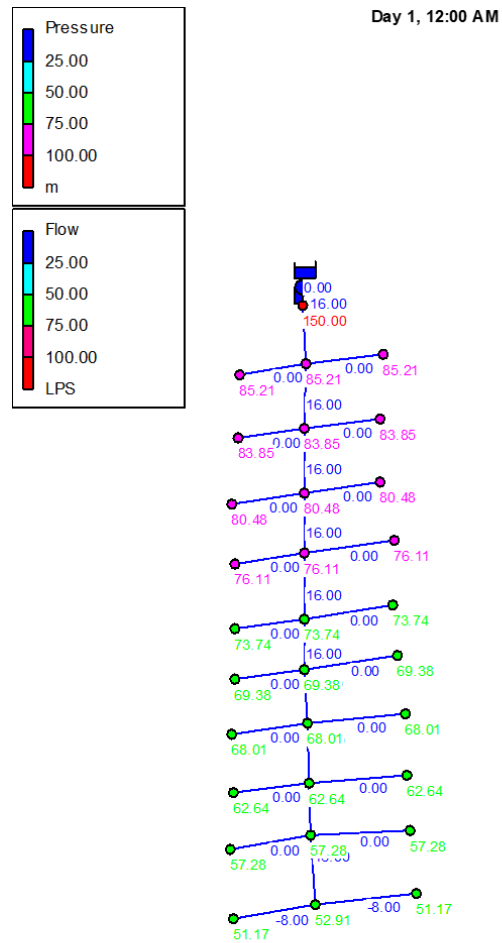


Figura 3 Modelo hidráulico 14 hectáreas

A partir del modelo anterior (*figura 4*), se extrajeron los datos de comportamiento físico a lo largo de la conducción. Así consolidando los perfiles longitudinales de presión y elevación con respecto a la distancia acumulada desde el punto de inicio de la red.

Tabla 14 Perfil de presiones (14 ha)

Perfil longitudinal de presiones 14 hectáreas

Presión (m)	Distancia (m)
150	0
85.21	150
83.25	220
80.48	290
76.11	360
73.74	430
69.38	500
68.01	570
62.64	640
57.28	710
52.91	780

Fuente: Cevallos, 2026

Perfil longitudinal de presiones

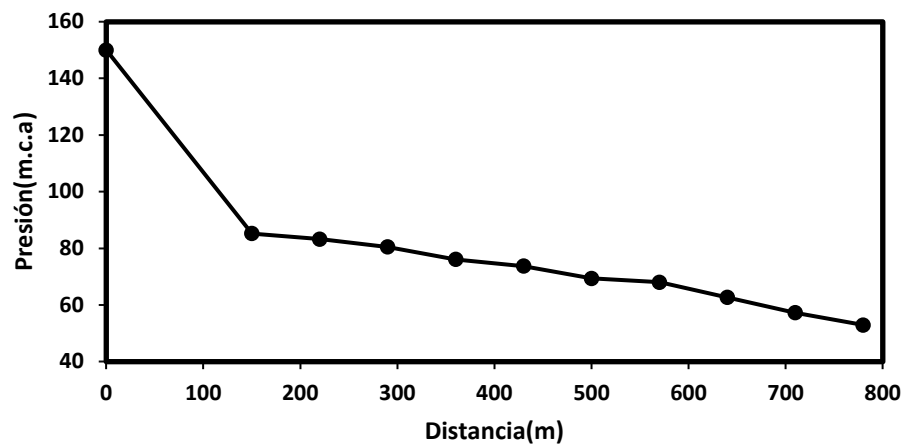


Figura 4 Perfil de presiones 14 hectáreas

Tabla 15 Perfil elevación (14ha)

Perfil longitudinal de elevación 14 hectáreas	
Distancia (m)	Elevación (m.s.n.m)
0	58
150	64
220	65
290	68
360	72
430	74
500	78
570	79
640	84
710	89
780	93

Fuente: Cevallos, 2026

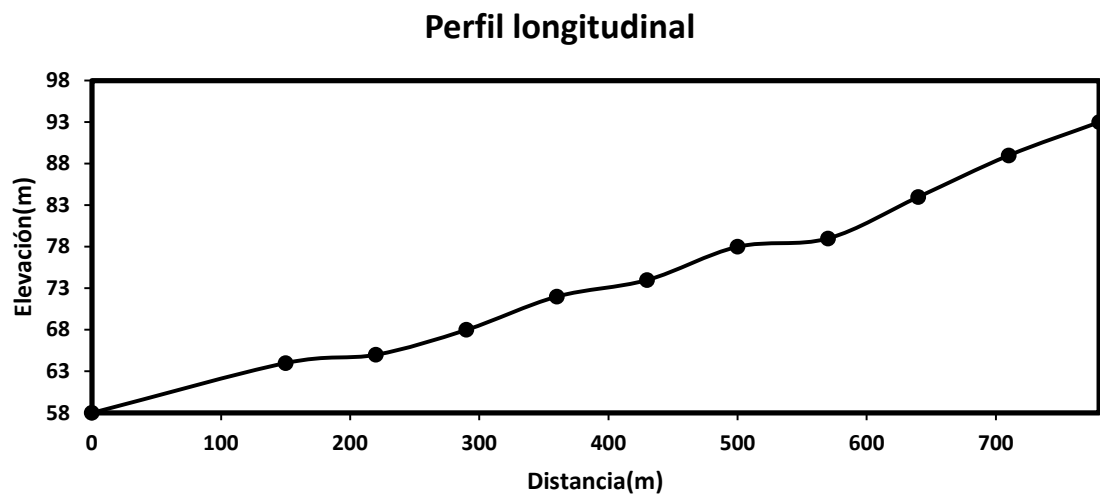


Figura 5 Perfil longitudinal 14 hectáreas

3.8.1.2 Escenario alternativo de 7 hectáreas

Con el propósito de evaluar la eficiencia de sistema bajo un esquema de sectorización u optimización de área de riego, se procedió a modelar una alternativa de 7 hectáreas. En la (figura 6) se presenta la simulación hidráulica para este escenario secundario, manteniendo la condición operativa del diseño original y evaluando la respuesta de presiones y caudales en la red.

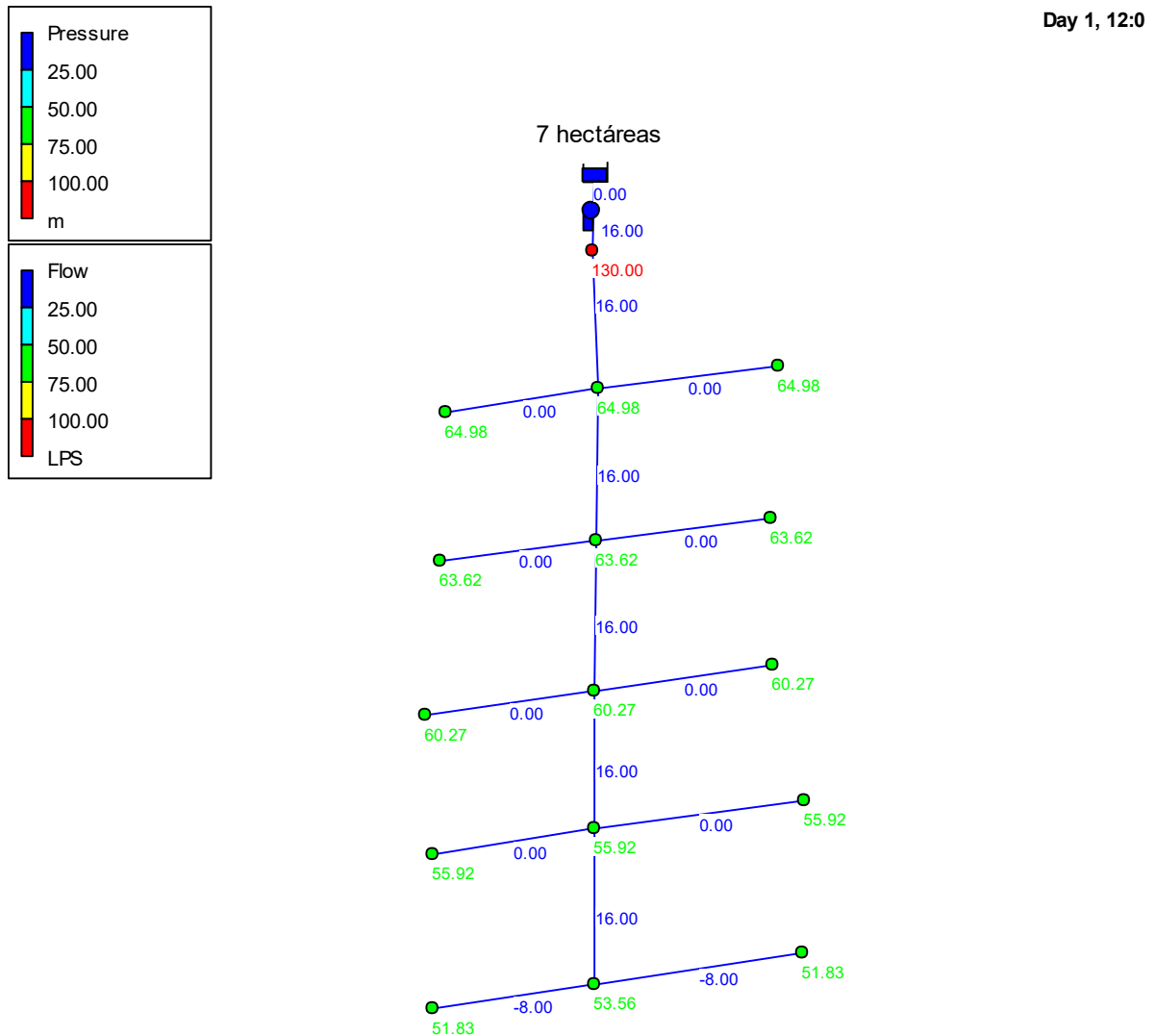


Figura 6 Modelo Hidráulico 7 hectáreas

De igual manera en el caso anterior, se procesaron los datos geométricos e hidráulicos para generar los perfiles longitudinales. Los valores numéricos extraídos y sus respectivas curvas de comportamiento se consolidan en (tabla 15).

Tabla 16 Perfil de presiones (7 ha)
Perfil longitudinal de presiones 7 hectáreas

Presión (m)	Distancia (m)
130	0
64.98	150
63.62	220
60.27	290
55.92	360
53.56	430

Fuente: Cevallos, 2026

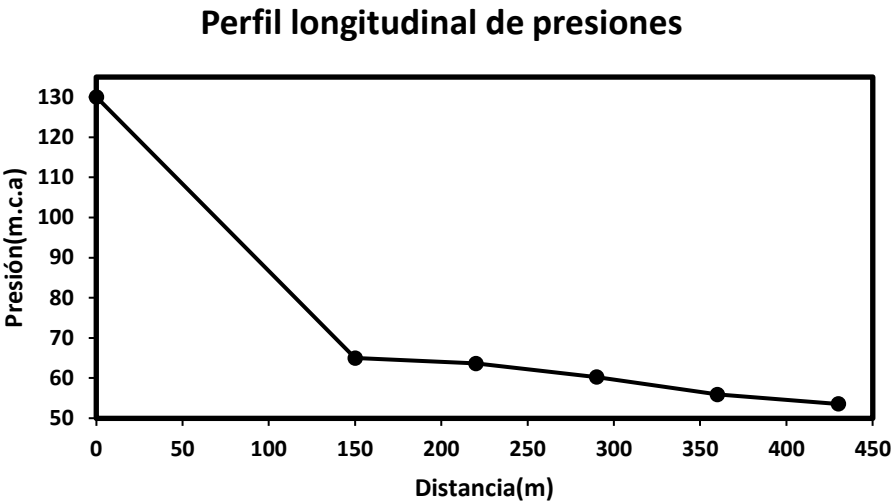


Figura 7 Perfil de presiones 7 hectáreas

Tabla 17 Perfil de elevación (7 ha)

Perfil longitudinal de elevación (m)

Distancia (m)	Elevación (m)
0	58
150	64
220	65
290	68
360	72
430	74

Fuente: Cevallos, 2026

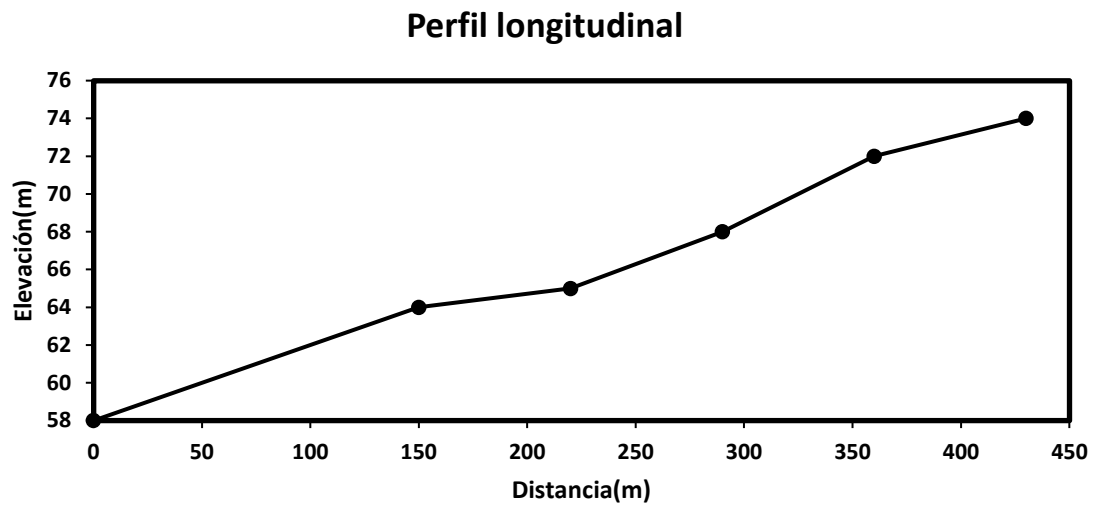


Figura 8 Perfil longitudinal 7 hectáreas

3.8.2 Evaluación comparativa

Tabla 18 Cálculo de bomba

Escenario evaluado	Potencia Hidráulica (hp)	Eficiencia (%)	Altura dinámica (m)	Potencia de motor (hp)	Bomba centrífuga comercial (hp)
14 ha	19.5	70	91.80	28.00	30
7 ha	16	70	75	22.90	25

Fuente: Cevallos, 2026

3.8.2.1 Análisis comparativo de dimensionamiento del reservorio por escenarios y tiempos de almacenamiento

Con el objetivo de definir la infraestructura de almacenamiento óptima para asegurar la continuidad del riego, se evaluó el dimensionamiento del reservorio bajo cuatro escenarios combinando áreas de diseño (14 y 7 ha) y dos periodos críticos de almacenamiento de recurso hídrico (6 y 3 meses). Este análisis integra variables críticas como lámina de riego por evaporación y pérdidas volumétricas asociadas para determinar las dimensiones geométricas finales de la estructura. Los resultados consolidados se muestran en la (tabla 17).

Tabla 19 Alternativas de diseño

Situación	Área (ha)	Estiaje (meses)	Reservorio inicial (m3)	Volumen de pérdida (m3)	Reservorio total (m3)	Profundidad de reservorio (m)	Área de reservorio (m2)
1	14	6	41.472	6.956	48.429	4	12.107
2	7	6	31.104	5.217,70	36.322	4	9.080
3	14	3	20.736	3.478,50	24.215	4	6.053
4	7	3	15.552	2.608,85	18.161	4	4.540

Fuente: Cevallos, 2026

3.8.3 Presupuesto

Tabla 20 Presupuesto comparativo

Rubro	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
-	14 ha – 6 meses	14 ha – 3 meses	7 ha – 6 meses	7 ha – 3 meses
Tubería	13,100.7	13,100.7	6,783.3	6,783.3
Accesorios y emisores	1,763	1,763	1,584.5	1,584.5
Movimiento tierra (zanjas)	3,712.8	3,712.8	1,898.4	1,898.4
Movimiento tierra (reservorio)	67,800.6	33,899.6	50,850.8	25,425.4
Geomembrana	30,268.12	15,133.7	22,701.25	11,350.63
Bomba	3,000	3,000	2,200	2,200
Total (Usd)	119,645.2	70,609.8	86,015.3	49,239.28

Fuente: Cevallos, 2026

Tabla 21 Distribución porcentual del presupuesto

Rubro	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Tubería	10.9%	19%	8%	14%
Accesorios y emisores	1.5%	2%	1.8%	3.2%
Movimiento de tierra (zanjas)	3.1%	5%	2%	4%
Movimiento de tierra (reservorio)	56.7%	48%	59%	52%
Geomembrana	25.3%	21%	26%	23%
Bomba	2.5%	4%	3%	4%
Total	100%	100%	100%	100%

Fuente: Cevallos, 2026

CONCLUSIONES

- El uso de tecnología fotogramétrica de alta resolución permitió superar las limitaciones de la interpolación de los métodos tradicionales, capturando millones de puntos que reflejan con precisión la irregularidad altimétrica de la zona. Esta precisión geométrica fue indispensable para definir un trazado optimizado de la línea madre de 760 m y modelar las variaciones de presión hidrodinámica provocadas por el desnivel topográfico crítico de 35 m, se concluye que la topografía irregular de San Miguel de Briceño valida técnicamente la elección de un sistema presurizado mediante torres fijas , ya que permite mitigar los efectos del relieve sobre la uniformidad de la lámina de riego aplicando criterios precisos de traslape.
- Los cálculos basados en la relación agua-suelo-plantas demostraron que la selección de una boquilla de 18 (mm) operando a 5 (atm) entrega una lámina de riego horaria de 6.58 mm/h, este valor es técnicamente idóneo, ya que se acopla perfectamente a la velocidad de infiltración del suelo arcilloso local garantizando la absorción óptima de humedad. Hidráulicamente, el dimensionamiento escalonado de las tuberías para la línea madre y las secundarias demostró ser eficiente en las simulaciones, manteniendo velocidades de flujo por debajo del límite de desgaste y otorgando la presión necesaria para los aspersores en los puntos más lejanos y críticos.
- El análisis hidrodinámico determinó que la ruta crítica del sistema presenta pérdidas de carga totales por fricción y accesorios relativamente bajas (6.80m) , lo cual ratifica el buen dimensionamiento de los diámetros de conducción seleccionados. Sin embargo, la altura dinámica total (91.80 m.c.a.) se encuentra fuertemente influenciada por la alta presión de operación requerida por los emisores turbinados (50 m) y el desnivel topográfico (35m). Esto derivó en el requerimiento de una potencia de motor neta de 28 calculada para una eficiencia del 70% , demostrando que la energía del sistema se consume mayoritariamente en vencer la gravedad y otorgar la energía de pulverización al agua, y no en pérdidas del circuito.
- Se elaboró el presupuesto referencial y el análisis comparativo de las cuatro alternativas de diseño para el sistema de riego, logrando determinar la viabilidad económica de cada propuesta. Del análisis se concluye que la Alternativa 4 (7 ha – 3 meses de estiaje) representa la opción económicamente más viable con una inversión mínima de \$49,239.28 USD, en contraste con la Alternativa 1 que

demanda el mayor costo (\$119,645.20 USD). Asimismo, la evaluación financiera demuestra que en todas las alternativas el rubro de mayor peso relativo es el Movimiento de tierra para el reservorio, representando entre el 48% y el 59% del presupuesto total, seguido por el costo de la geomembrana (21% - 26%), lo que evidencia que la viabilidad económica del proyecto está directamente condicionada por la magnitud de las obras civiles de almacenamiento hídrico.

RECOMENDACIONES

- Durante el replanteo definitivo en campo de las 30 torres de aspersión fijas , se utilicen los mismos puntos de referencia tridimensionales (X, Y, Z) establecidos en el Modelo Digital de Terreno (MDT) de Civil 3D. Esto evitará desviaciones geométricas en los ramales secundarios que superen las pendientes del 5% , asegurando que las presiones estáticas calculadas no varíen y que el traslape real en campo coincida con la superposición teórica simulada
- Se recomienda programar los ciclos operativos respetando estrictamente el tiempo de permanencia establecido de 1 hora por postura para los 2 aspersores simultáneos , completando las 15 horas por ciclo distributivo. Dado que el balance hídrico determinó que una lámina aplicada de 92.12 mm/mes satisface la demanda del cultivo de maíz en época seca , no se deben extender estos tiempos de riego, resguardando la estructura física del suelo.
- Al seleccionar la bomba centrífuga comercial en el mercado ecuatoriano (optando por capacidades de 30 hp o 35 hp según la holgura técnica requerida) , se debe exigir el catálogo del fabricante para verificar que el punto de operación de diseño (16 l/s a 91.80 m.c.a.) coincida estrictamente con el Punto de Máxima Eficiencia (BEP) de la curva característica.
- Seleccionar la Alternativa 4 para la ejecución del proyecto si el objetivo primordial es minimizar el requerimiento de capital inicial, optimizando la relación costo-beneficio para un área de 7 hectáreas. No obstante, si las necesidades del proyecto exigen cubrir la máxima extensión agrícola (14 ha), se sugiere optar por la Alternativa 2 (\$70,609.80 USD), debido a que ofrece un ahorro del 41% en comparación con la alternativa más costosa (Alternativa 1), manteniendo la misma capacidad de cobertura. Adicionalmente, dado que las obras civiles del reservorio y el revestimiento con geomembrana concentran más del 70% de la inversión en todos los escenarios, se recomienda priorizar procesos de negociación y licitación competitiva con proveedores de estos rubros específicos durante la fase de contratación, asegurando así la estabilidad financiera y la viabilidad económica en la futura ejecución de la infraestructura hídrica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrocalidad. (2025). *Buenas practicas agricolas*. <https://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/2020/05/material1.pdf>
- Asamblea aprobó la Ley de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua | Asamblea Nacional del Ecuador*. (s. f.). Recuperado 10 de abril de 2026, de <https://www.asambleanacional.gob.ec/es/contenido/asamblea-aprobo-la-ley-de-recursos-hidricos-usos-y-0>
- Assan, M. (2025). *RELACION AGUA SUELO PLANTA*. [https://editorial.unca.edu.ar/Publicacione%20on%20line/CUADERNOS%20DE%20CATEDRA/Guia%20didactica%20RASPAS%20Assan.pdf#:~:text=Se%20describe%20aqu%C3%AD%20la%20relaci%C3%B3n%20existente%20entre,plantas%20el%20recurso%20\(movimientos%20apopl%C3%A1sticos%20y%20simpl%C3%A1sticos\)](https://editorial.unca.edu.ar/Publicacione%20on%20line/CUADERNOS%20DE%20CATEDRA/Guia%20didactica%20RASPAS%20Assan.pdf#:~:text=Se%20describe%20aqu%C3%AD%20la%20relaci%C3%B3n%20existente%20entre,plantas%20el%20recurso%20(movimientos%20apopl%C3%A1sticos%20y%20simpl%C3%A1sticos)).
- Clima – INAMHI*. (s. f.). Recuperado 24 de marzo de 2026, de <https://servicios.inamhi.gob.ec/clima/>
- Facultad de Ingeniería Civil*. (s. f.). Recuperado 10 de abril de 2026, de <https://portal.ucol.mx/fic/topo05.htm>
- Ge, M., Wu, P., Zhu, D., & Zhang, L. (2020). Comparisons of spray characteristics between vertical impact and turbine drive sprinklers—A case study of the 50PYC and HY50 big gun-type sprinklers. *Agricultural Water Management*, 228, 105847. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105847>
- MAGP. (2022). *Acuerdo-Ministerial*. <https://www.ambienteenergia.gob.ec/ambiente/wp-content/uploads/sites/2/downloads/2023/01/Acuerdo-Ministerial-Nro.-MAATE-2022-096.pdf>
- PILCO ALVAREZ, N. S. (2025). *EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO EN LA QUEBRADA LAS ABRAS DE LA COMUNIDAD DE SAN PABLO PERTENECIENTE AL CANTÓN GUANO*.

<https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/df36d6e7-565d-4a14-8670-88c4ff7f004c/content>

Plan Nacional de Riego y Drenaje – Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. (s. f.). Recuperado 10 de abril de 2026, de <https://www.agricultura.gob.ec/el-plan-nacional-de-riego/>

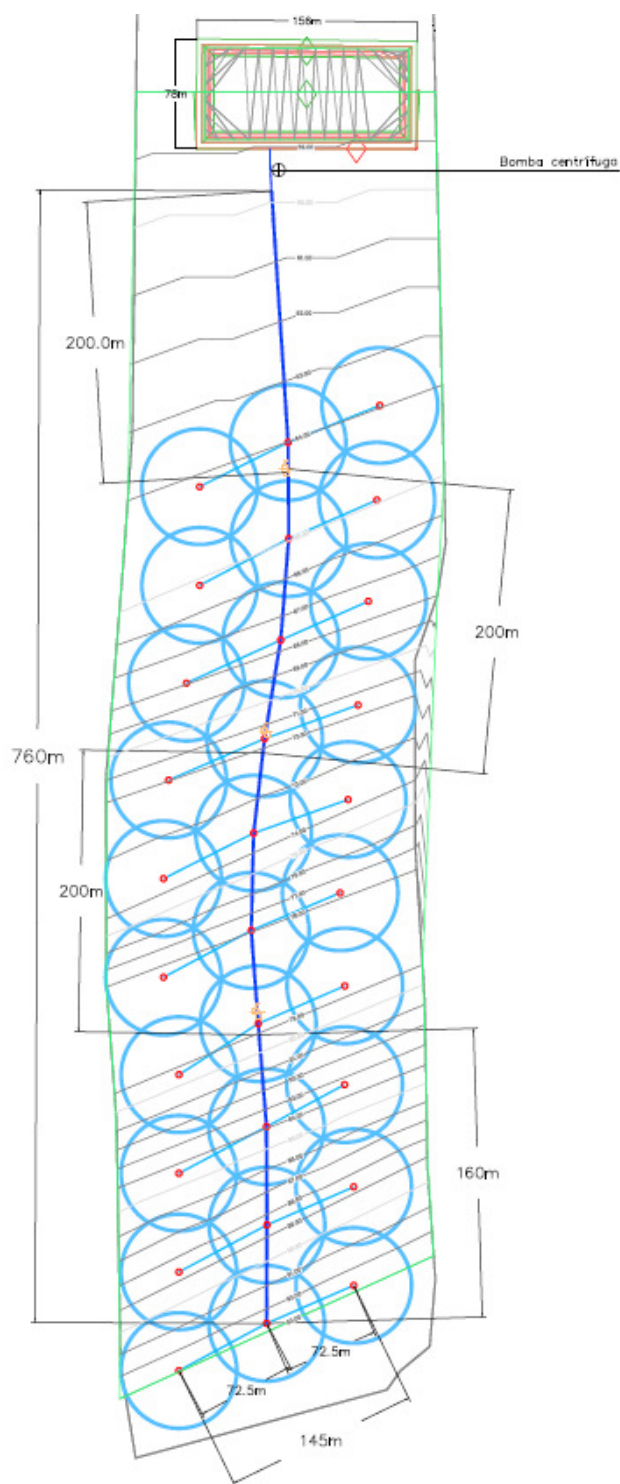
The Advantages of Drone Surveying vs. Traditional Methods | ROCK Robotic | ROCK Robotic. (s. f.). Recuperado 10 de abril de 2026, de <https://www.rockrobotic.com/articles/the-advantages-of-drone-mapping-vs-traditional-methods/>

Topografía con drones: Cómo funciona y qué precisión esperar | Wingtra. (s. f.). Recuperado 10 de abril de 2026, de https://wingtra.com/es/topografia-sig/?srsId=AfmBOopLpxewVZQRMMXWgbvc_ObUVP5ZuZv50XRA_NnsL2oh0NJgtrnq

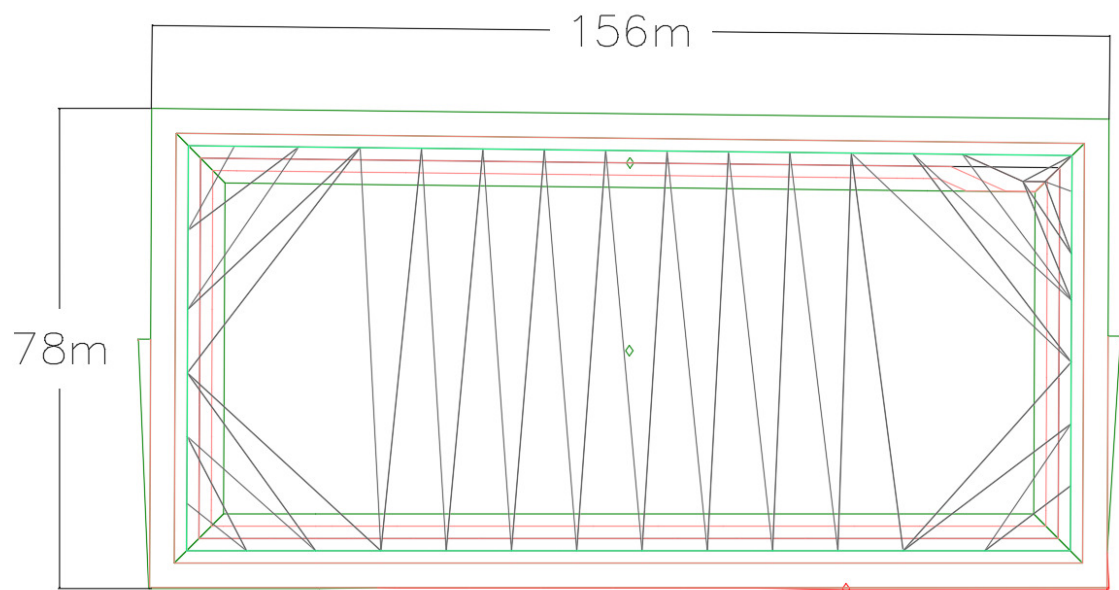
UNE-EN ISO 11545:2002 Equipos de riego. Pivote central y siste... (s. f.). Recuperado 10 de abril de 2026, de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=norma-une-en-iso-11545-2002-n0027194>

WaterCAD: The Premier Hydraulic Analysis and Design Software for Water Distribution Systems—CTTEC. (s. f.). Recuperado 10 de abril de 2026, de <https://www.cttec.in/watercad/>

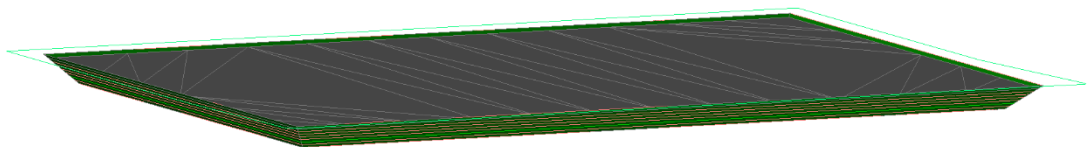
ANEXO A



Anexo A1- Red 14 hectáreas

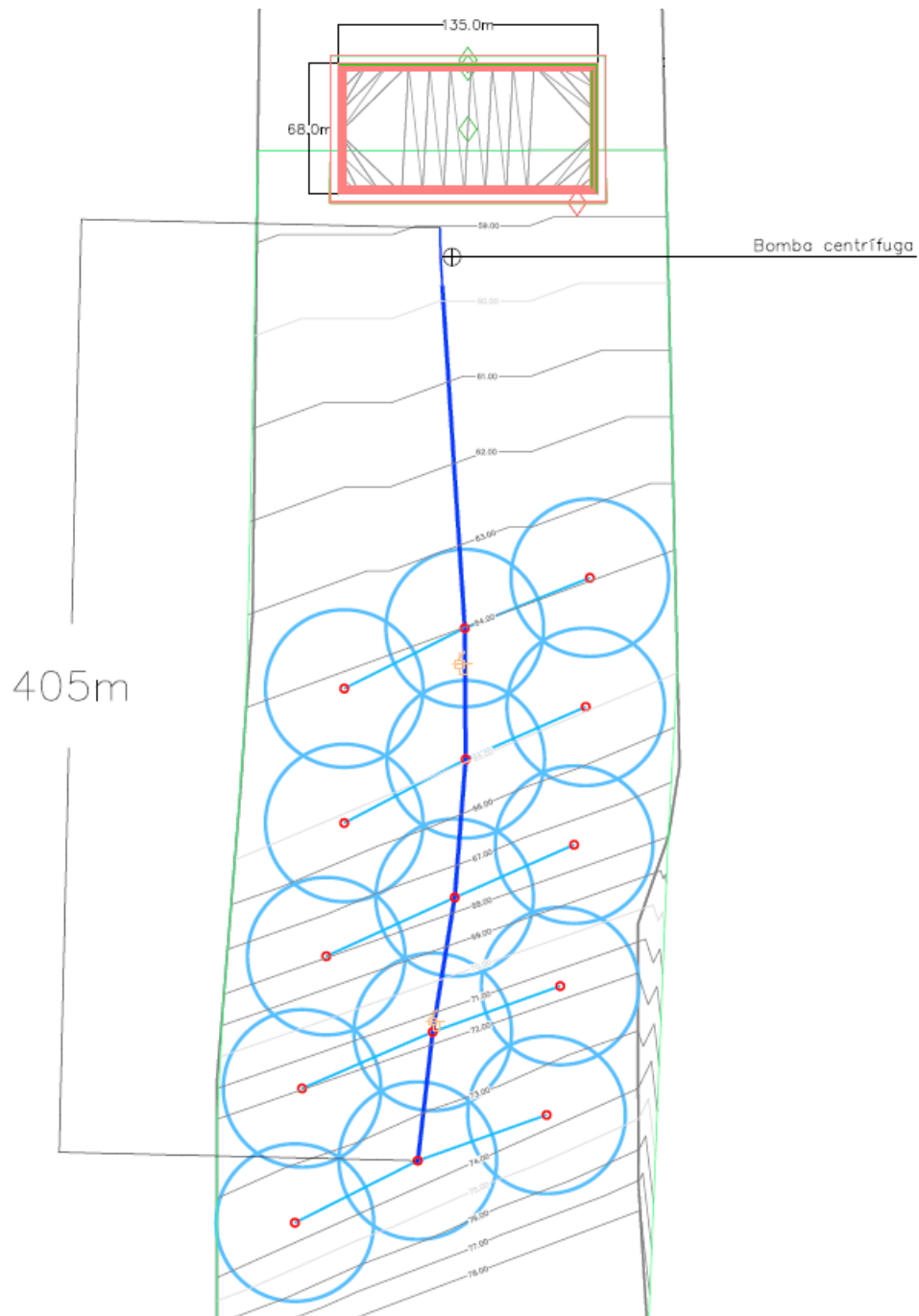


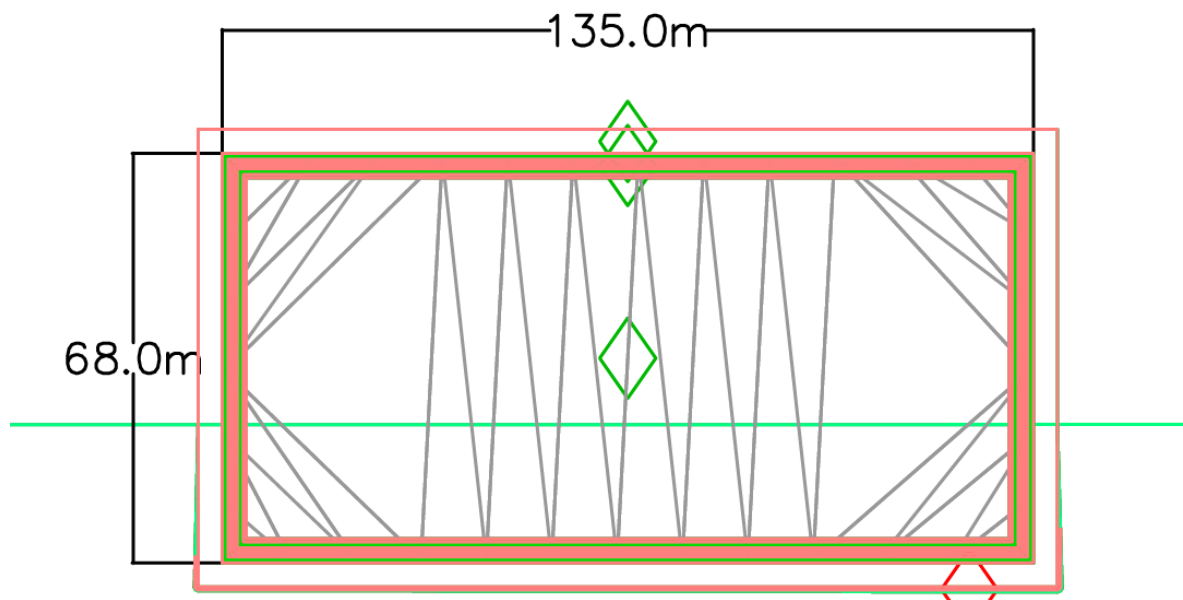
Anexo A2 Reservorio 14 hectáreas



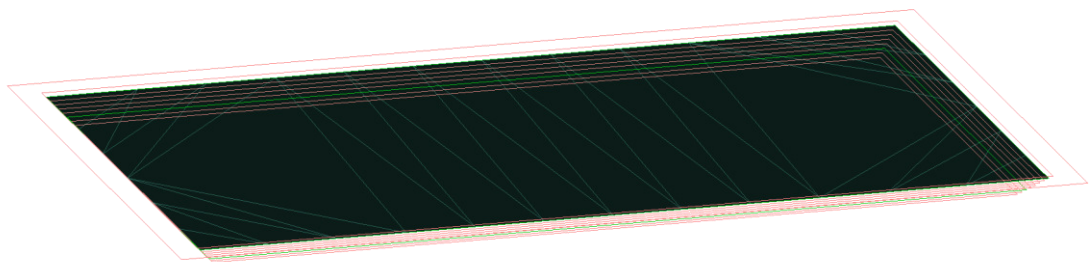
AnexoA3 - Modelo reservorio 14 hectáreas

ANEXO B





AnexoB2 - Reservorio 7 hectáreas



AnexoB3 - Modelo reservorio 7 hectáreas