



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA INGENIERÍA CIVIL

“Desempeño hidráulico del sistema de riego por aspersión comunidad
Sanjapamba: Mediante modelo matemático”

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Civil

Autor:

Estrada Bulla, Andrés Fernando

Tutor:

MSc. María Gabriela Zúñiga Rodríguez

Riobamba, Ecuador. 2024

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **Andrés Fernando Estrada Bulla**, con cédula de ciudadanía **0605314715**, autor del trabajo de investigación titulado: **“Desempeño hidráulico del sistema de riego por aspersión comunidad Sanjapamba: Mediante modelo matemático”**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 26 de noviembre de 2024.



Andrés Fernando Estrada Bulla

C.I: 0605314715

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, **Mgs. María Gabriela Zúñiga Rodríguez** catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: **“Desempeño hidráulico del sistema de riego por aspersión comunidad Sanjapamba: Mediante modelo matemático”**, bajo la autoría de **Andrés Fernando Estrada Bulla**; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 26 días del mes de noviembre de 2024.



Mgs. María Gabriela Zúñiga Rodríguez

C.I: 0604004945

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “**Desempeño hidráulico del sistema de riego por aspersión comunidad Sanjapamba: Mediante modelo matemático**” por **Andrés Fernando Estrada Bulla**, con cédula de identidad número **0605314715**, bajo la tutoría de **Mgs. María Gabriela Zúñiga Rodríguez**; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 05 de diciembre de 2024.

Diana Carolina Merino Gavilanes, Mgs.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



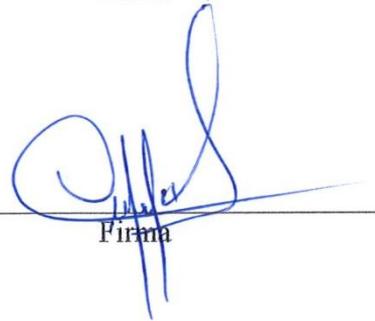
Firma

Jessica Paulina Brito Noboa, Mgs.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firma

Nelson Estuardo Patiño Vaca, Mgs.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firma



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO



UNACH-RGF-01-04-08.15
VERSIÓN 01: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **ESTRADA BULLA ANDRÉS FERNANDO** con CC: **0605314715**, estudiante de la Carrera de **INGENIERÍA CIVIL**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado **"DESEMPEÑO HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE RIEGO POR ASPERSIÓN COMUNIDAD SANJAPAMBA: MEDIANTE MODELO MATEMÁTICO"**, cumple con el 9 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 26 de noviembre de 2024

Mgs. María Gabriela Zúñiga Rodríguez
TUTOR(A)

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación a Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino. Gracias por darme la sabiduría, la paciencia y el valor necesario para enfrentar los desafíos. Tus bendiciones me han permitido llegar hasta aquí. A Ti, Señor, dedico este logro con humildad y gratitud.

A mis queridos padres. A mi madre, Beatriz, por su amor incondicional, dedicación y apoyo constante, especialmente en los momentos más difíciles de mi vida. A mi padre, Iván, por sus valiosos consejos, por ser mi maestro de vida y ejemplo de superación. Han sido ellos quienes me han motivado a seguir adelante, siempre persiguiendo mis sueños y logrando mis metas.

A mis hermanos, Santiago y Camila, por su apoyo inquebrantable y por ser la fuente constante de motivación que me impulsa a seguir adelante y nunca rendirme.

A mis abuelitos, Marco y Georgina, por su amor, enseñanzas y respaldo incondicional. Gracias por ser siempre mi base de inspiración y por darme fuerzas para seguir adelante en cada etapa de mi vida.

Finalmente, a mi abuelita Bertha, por su apoyo y motivación desde el primer día de mi vida universitaria. Aunque ya no esté físicamente, sé que desde el cielo me cuida y ha bendecido mi camino, guiándome hasta este importante logro.

Andrés Fernando Estrada Bulla

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a Dios, por el regalo preciado de la vida y la salud, por su guía constante y por permitirme culminar esta etapa importante en mi vida.

A mis padres, Beatriz e Iván, por su amor incondicional, apoyo constante y sacrificios. Sin su aliento y motivación, este logro no habría sido posible. Gracias por siempre creer en mí y ser mi fuente de inspiración.

A mis hermanos, Santiago y Camila, les agradezco de corazón por su amor y apoyo incondicional, siempre estando a mi lado. Su presencia ha sido un pilar constante de fortaleza y motivación en cada etapa de este camino.

A toda mi familia, por su amor, apoyo y por estar siempre presentes en cada momento de este proceso. Su aliento constante, su confianza y su cariño han sido fundamentales en mi camino.

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutora de tesis, Mgs. Gabriela Zúñiga, por su constante acompañamiento, orientación y apoyo incondicional. Su dedicación, paciencia y valiosos consejos fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad Nacional de Chimborazo, por brindarme la oportunidad de cursar mis estudios universitarios. De manera especial, a la carrera de Ingeniería Civil y a sus docentes, cuya formación académica y personal han sido fundamentales en mi desarrollo profesional.

A mis amigos, por su apoyo constante, por estar a mi lado en los momentos de alegría, pero también en las tristezas y desafíos. Gracias por compartir risas, recuerdos y cada paso de este camino.

Finalmente, agradezco a la Comunidad de Sanjapamba, a su directiva y a todos sus habitantes, por su disposición y apoyo durante las visitas técnicas realizadas para el desarrollo de mi proyecto de investigación. Su colaboración y apertura han sido fundamentales para el éxito de este trabajo.

Andrés Fernando Estrada Bulla

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I.....	15
1.1 Introducción.....	15
1.2 Zona de estudio.....	16
1.3 Antecedentes.....	17
1.3.1 Captación y tanque de recolección.....	17
1.3.2 Redes de distribución.....	19
1.3.3 Topografía general de la zona.....	20
1.4 Planteamiento del Problema.....	21
1.5 Justificación.....	21
1.6 Objetivos.....	22
1.6.1 General.....	22
1.6.2 Específicos.....	22
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	23
2.1 Conceptos Generales.....	23
2.1.1 Sistemas de riego.....	23
2.1.2 Red de distribución de riego.....	23
2.1.3 Orígenes y principales tipos de riego.....	24
2.1.4 Riego por Aspersión.....	24
2.1.5 Modelo matemático hidráulico.....	25
2.1.6 Métodos de optimización.....	26
2.2 Estado del Arte.....	26
CAPÍTULO III. METODOLOGIA.....	28
3.1 Tipo de Investigación.....	28
3.2 Recolección de información y documentación.....	29
3.3 Población de estudio y tamaño de muestra.....	29
3.4 Identificación de áreas y aspersores.....	29

3.5	Toma de presiones en aspersores	29
3.6	Estimación del caudal in situ (Método de aforo en aspersores)	33
3.7	Análisis y procesamiento de datos	35
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		37
4.1	Modelo hidráulico	37
4.2	Resultados generales	40
4.3	Análisis de presiones y velocidades	45
4.4	Rendimiento hidráulico en aspersores	48
4.5	Información de válvulas del sistema de riego	51
4.6	Análisis comparativo de caudales actual vs diseño del sistema de riego.....	55
4.7	Análisis de Correlación de “Diámetro de Alcance vs Presión”.....	57
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.		59
5.1	Conclusiones	59
5.2	Recomendaciones	60
BIBLIOGRAFÍA.....		61
ANEXOS		63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Toma de medida de presión en aspersores.....	30
Tabla 2. Resultados de estimación de caudales mediante el Método de Aforo.....	34
Tabla 3. Línea 3 - Ramal Puso Rumi	35
Tabla 4. Línea 2 - Ramal Central 1.....	36
Tabla 5. Línea 1 - Ramal Central.....	36
Tabla 6. Resultados modelo hidráulico "Actual".....	43
Tabla 7. Resultados modelo hidráulico "Diseño"	43
Tabla 8. Características del Aspersor 5035 RM 3/4".....	44
Tabla 9. Rendimiento hidráulico de aspersores - Sistema de Riego Actual vs Diseño	48
Tabla 10. Válvulas Reductoras de Presión “Línea 1 - Ramal Central”	54
Tabla 11. Válvulas Reductoras de Presión “ Línea 2 - Ramal Central 1”.....	54
Tabla 12. Válvulas Reductoras de Presión “Línea 3 - Ramal Puso Rumi”.....	54
Tabla 13. Resumen de caudales "Actual vs Diseño"	55
Tabla 14. Válvulas contempladas en el simulador EPANET.....	63
Tabla 15. Hoja de cálculos hidráulicos del sistema de riego.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación Geográfica comunidad Sanjapamba.....	16
Figura 2. Cultivo de pasto forrajero.....	17
Figura 3. Tanque de reserva “Lobo Serena”	17
Figura 4. Vertientes en tanque reserva "Lobo Serena"	18
Figura 5. Reserva "Lirio Cocha"	18
Figura 6. Paso elevado	19
Figura 7. Esquema distribución de ramales	20
Figura 8. Topografía de conducción	20
Figura 9. Red de distribución ramificada.....	24
Figura 10. Metodología del proyecto de investigación.....	28
Figura 11. Método de aforo en aspersores	34
Figura 12. Método de aforo en reservorio "Lirio Cocha"	34
Figura 13. Simulación de reservorio en "EPANET"	37
Figura 14. Simulación de nodos en "EPANET"	38
Figura 15. Simulación de tuberías en "EPANET"	38
Figura 16. Simulación de válvulas en "EPANET"	39
Figura 17. Opciones hidráulicas en "EPANET"	39
Figura 18. Sistema de riego simulado en "EPANET"	40
Figura 19. Velocidades del sistema de riego “Actual”	41
Figura 20. Velocidades del sistema de riego “Diseño”.....	41
Figura 21. Presiones del sistema de riego “Actual”.....	42
Figura 22. Presiones del sistema de riego “Diseño”.....	42
Figura 23. Resultados de presiones "Actual"	45
Figura 24. Resultados de presiones "Diseño"	46
Figura 25. Resultados de velocidades "Actual"	47
Figura 26. Resultados de velocidades "Diseño"	47
Figura 27. Presiones Modelo Hidráulico Actual	49
Figura 28. Presiones Modelo Hidráulico Diseño.....	50
Figura 29. Diagrama Línea Piezométrica "Tramo 1"	51
Figura 30. Diagrama Línea Piezométrica "Tramo 2"	52
Figura 31. Diagrama Línea Piezométrica "Tramo 3"	52
Figura 32. Diagrama Línea Piezométrica "Tramo 4"	53

Figura 33. Diagrama Línea Piezométrica "Tramo 5"	53
Figura 34. Rendimiento general de aspersores.....	56
Figura 35. Rendimiento en aspersores "Sistema actual vs Sistema diseño"	56
Figura 36. Correlación Línea 3 - Ramal Puso Rumi.....	57
Figura 37. Correlación Línea 2 - Ramal Central 1	58
Figura 38. Correlación Línea 1 - Ramal Central	58

RESUMEN

Los sistemas de riego por aspersión son una de las tecnologías más efectivas para distribuir agua a los cultivos de manera uniforme. Pero, existen ciertos problemas entre el diseño teórico y su desempeño actual en campo. A pesar de las especificaciones técnicas y cálculos de diseño, muchos sistemas enfrentan dificultades para cumplir con el rendimiento adecuado para la distribución de agua. Por tal motivo el presente estudio tiene como objetivo evaluar el desempeño del sistema de riego por aspersión en la comunidad de Sanjapamba, San Andrés, determinando su comportamiento hidráulico y rendimiento. Para ello, se desarrolló un modelo matemático que permite comparar el desempeño actual del sistema con su diseño original, identificando diferencias, tendencias o relaciones significativas. La investigación sigue un enfoque metodológico mixto, combinando aspectos cuantitativos y cualitativos. En la parte cuantitativa, se llevó a cabo la recolección y análisis de datos hidráulicos, empleando el modelo matemático EPANET para simular el comportamiento del sistema de riego. Esta simulación permite evaluar parámetros como presión, velocidad y caudal. En la parte cualitativa, las visitas de campo proporcionaron información sobre las operaciones, el estado y el mantenimiento del sistema, incluyendo también la toma de presiones y aforo in situ. Finalmente, los resultados revelan que el sistema real supera en ciertos puntos los parámetros establecidos en el diseño original, particularmente en aspersores específicos, donde se registran valores superiores en velocidad, caudal y presión. Esta desviación recomienda la necesidad de realizar ajustes operativos para optimizar la eficiencia hidráulica del sistema, garantizando una operación más acorde con los requisitos de diseño y el uso eficiente de los recursos.

Palabras claves: sistema, riego, aspersión, desempeño hidráulico, Epanet.

ABSTRACT

Sprinkler irrigation systems are one of the most effective technologies for distributing water uniformly to crops. But, there are certain problems between theoretical design and their actual performance in the field. Despite the technical specifications and design calculations, many systems face difficulties to meet the adequate performance for water distribution. For this reason, the present study aims to evaluate the performance of the sprinkler irrigation system in the community of Sanjapamba, San Andres, determining its hydraulic behavior and performance. For this purpose, a mathematical model was developed to compare the current performance of the system with its original design, identifying differences, trends or significant relationships. The research follows a mixed methodological approach, combining quantitative and qualitative aspects. In the quantitative part, the collection and analysis of hydraulic data was carried out, using the EPANET mathematical model to simulate the behavior of the irrigation system. This simulation allows the evaluation of parameters such as pressure, velocity and flow rate. In the qualitative part, field visits provided information on the operations, condition and maintenance of the system, including in situ pressure measurements and gauging. Finally, the results reveal that the actual system exceeds the parameters established in the original design at certain points, particularly in specific sprinklers, where higher values in velocity, flow and pressure are recorded. This deviation recommends the need for operational adjustments to optimize the hydraulic efficiency of the system, ensuring operation more in line with design requirements and efficient use of resources.

Keywords: system, irrigation, sprinkling, hydraulic performance, Epanet.



Reviewed by:
Ms.C. Ana Maldonado León
ENGLISH PROFESSOR
C.I.0601975980

CAPÍTULO I.

1.1 Introducción

El agua y el sistema de riego desempeñan un papel fundamental en la agricultura, siendo dos elementos estrechamente relacionados que influyen directamente en la producción de cultivos a nivel mundial. El agua es el recurso vital que permite la vida de las plantas, siendo esencial para su crecimiento, desarrollo y, además, para la seguridad alimentaria de la humanidad. Sin embargo, la disponibilidad de agua no siempre coincide con las necesidades de los cultivos, lo que ha llevado al desarrollo y la implementación de sistemas de riego sofisticados y eficientes (Perez, 2021).

Los sistemas de riego son una pieza clave al proporcionar un control preciso sobre la entrega de agua a los cultivos, asegurando que las plantas reciban la cantidad adecuada en el momento oportuno. Desde el riego por gravedad hasta las tecnologías de riego por aspersión y riego por goteo, estos sistemas han evolucionado para satisfacer las demandas de la agricultura moderna, maximizando la eficiencia en el uso del agua y minimizando el desperdicio (Losada, 2016).

El comportamiento hidráulico de un sistema de riego es un aspecto fundamental en la agricultura y la gestión del agua en la irrigación. Este término se refiere a cómo el agua fluye, se distribuye y se utiliza dentro de un sistema de riego, y es esencial comprenderlo para garantizar un uso eficiente de los recursos hídricos y el éxito de la producción agrícola (Rodríguez, 2011).

La eficacia de un sistema de riego depende de diversos factores, como la presión del agua, el diámetro y la longitud de las tuberías, la capacidad de los emisores (aspersores, goteros, etc.) y la uniformidad de la distribución del agua en el campo (Antunez, 2016).

El propósito de esta investigación es analizar el comportamiento hidráulico y evaluar el desempeño del sistema de riego por aspersión en la comunidad de Sanjapamba. Para ello, se examinarán las presiones actuales del sistema en operación y se compararán con los resultados obtenidos mediante un modelo matemático. A partir de este análisis, se propondrán mejoras en las redes de abastecimiento, con el fin de optimizar la distribución de caudales y generar beneficios para los usuarios, asegurando que reciban los caudales adecuados para sus necesidades.

1.2 Zona de estudio

La comunidad de Sanjapamba se ubica en la parroquia San Andrés del Cantón Guano, a 15 km de la ciudad de Riobamba capital de la Provincia de Chimborazo. Se encuentra al Noreste del Cantón Guano, al pie del Nevado Chimborazo, limitada al norte por el Nevado Chimborazo, al sur con la Comuna Cuatro esquinas y Punguquí, al este la Comuna Silveria y Santa Lucía, y al oeste Comuna Tambo Huasha. La Figura 1 ilustra la ubicación geográfica de la comunidad de Sanjapamba.

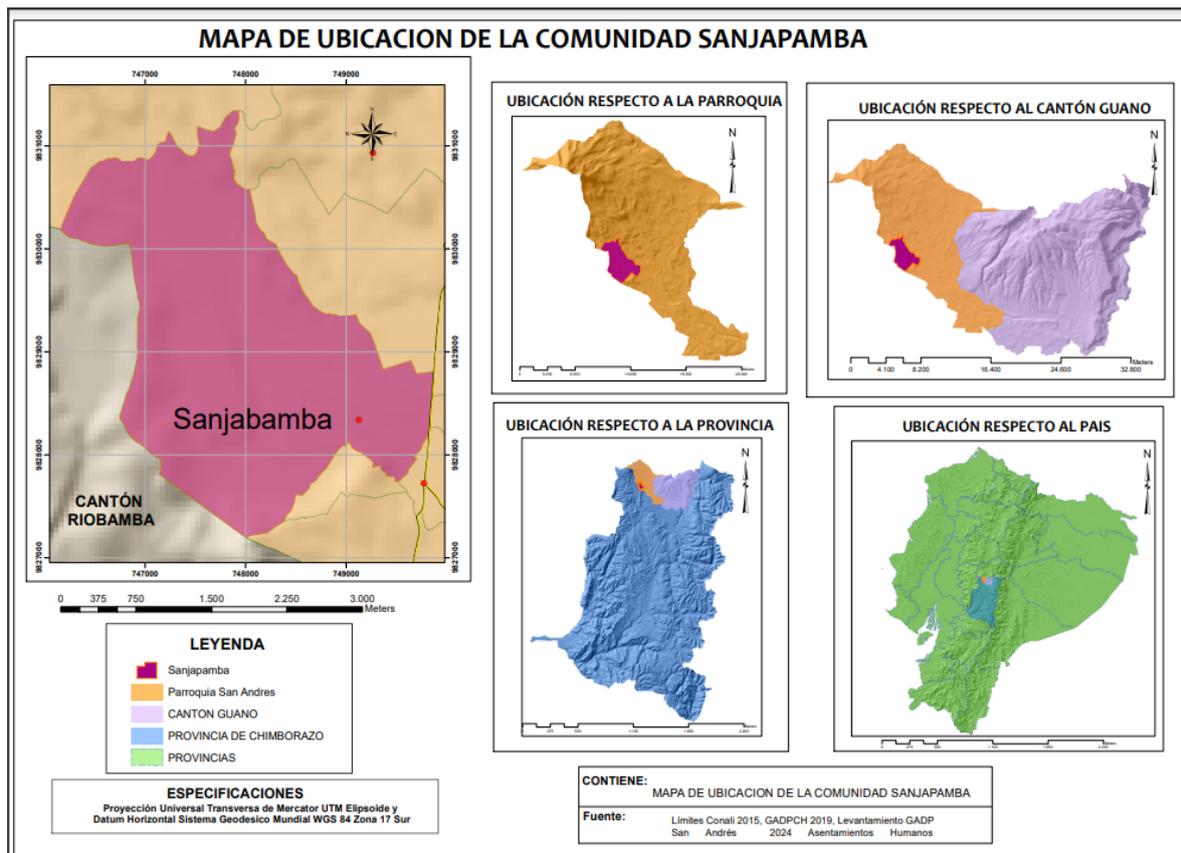


Figura 1. Ubicación Geográfica comunidad Sanjapamba

Fuente: (GADP San Andrés, 2024)

El suelo de la comunidad de Sanjapamba presenta una textura franco-arenosa, lo que favorece un adecuado drenaje y una capacidad moderada de retención de humedad, condiciones óptimas para el crecimiento de cultivos forrajeros. El patrón de cultivo predominante en la zona está orientado al cultivo de pasto forrajero, utilizado principalmente para la alimentación del ganado, una actividad agrícola fundamental para la producción pecuaria local, como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Cultivo de pasto forrajero

Fuente: Elaboración propia

El sistema de riego en la comunidad de Sanjapamba abarca una superficie total de 46.69 ha, de las cuales 5.09 ha corresponden al área cubierta por los aspersores seleccionados para el análisis desarrollado en este estudio.

1.3 Antecedentes

1.3.1 Captación y tanque de recolección

La conducción del sistema de riego se proyecta en tubería de PVC desde las vertientes que rodean la topografía del terreno hasta el tanque de distribución en el sector conocido como Lobo Serena (Figura 3), el mismo que se beneficia de la contribución de seis vertientes, las cuales son cuidadosamente canalizadas para alimentar el suministro de agua en toda la comunidad.



Figura 3. Tanque de reserva “Lobo Serena”

Fuente: Elaboración propia

A través de un aforo realizado in situ, se ha determinado un caudal promedio de 19.5 l/s. Este valor es fundamental para asegurar una distribución equilibrada y eficiente de los recursos hídricos, permitiendo un dimensionamiento adecuado de las redes de conducción y una correcta operación del sistema de riego. La Figura 4 ilustra las vertientes que integran el sistema de abastecimiento hacia el tanque de reserva Lobo Serena.



Figura 4. Vertientes en tanque reserva "Lobo Serena"

Fuente: Elaboración propia

Según el GAD Provincial de Chimborazo (2016), el sistema de riego de la comunidad de Sanjapamba utiliza una tubería de PVC de 160 mm (0.63MPa) para conducir el agua hasta un tanque de reserva con capacidad de 500 m³, ubicado en el sector de Lirio Cocha. Este diseño permite almacenar el caudal disponible durante la noche y realizar la distribución durante el día. El objetivo es garantizar tanto la eficiencia del riego como la protección de los animales de pastoreo, la vida silvestre, los niños, adultos y operadores del sistema.



Figura 5. Reserva "Lirio Cocha"

Fuente: Elaboración propia

La Figura 5 presenta la ubicación del tanque de almacenamiento, desde el cual se realiza la distribución de agua a los usuarios de la comunidad de Sanjapamba. La red de distribución se compone de cinco ramales principales, diseñados e instalados estratégicamente conforme a la topografía del terreno, con el fin de optimizar la entrega del recurso hídrico a los diferentes sectores de la comunidad.

1.3.2 Redes de distribución

De acuerdo con el GAD Provincial de Chimborazo (2016), la configuración del sistema de riego se basó en la subdivisión de los terrenos destinados al riego. A partir de este análisis, se establecieron los ramales principales, los cuales fueron posicionados de manera estratégica para asegurar una distribución uniforme del agua y un acceso eficiente para todos los usuarios del sistema.

Cabe mencionar que en los ramales se emplea tubería de PVC y en cada uno de ellos se encuentran instaladas válvulas reductoras de presión, ubicadas a partir de las presiones requeridas en el diseño del proyecto. Adicionalmente, el sistema cuenta con pasos elevados, compuestos por estructuras metálicas (Figura 6), que aseguran el correcto funcionamiento de la tubería de conducción.



Figura 6. Paso elevado

Fuente: Elaboración propia

Considerando estos factores, la Figura 7 muestra la disposición y organización hidráulica del sistema de riego en la comunidad de Sanjapamba, destacando la distribución de los ramales principales.

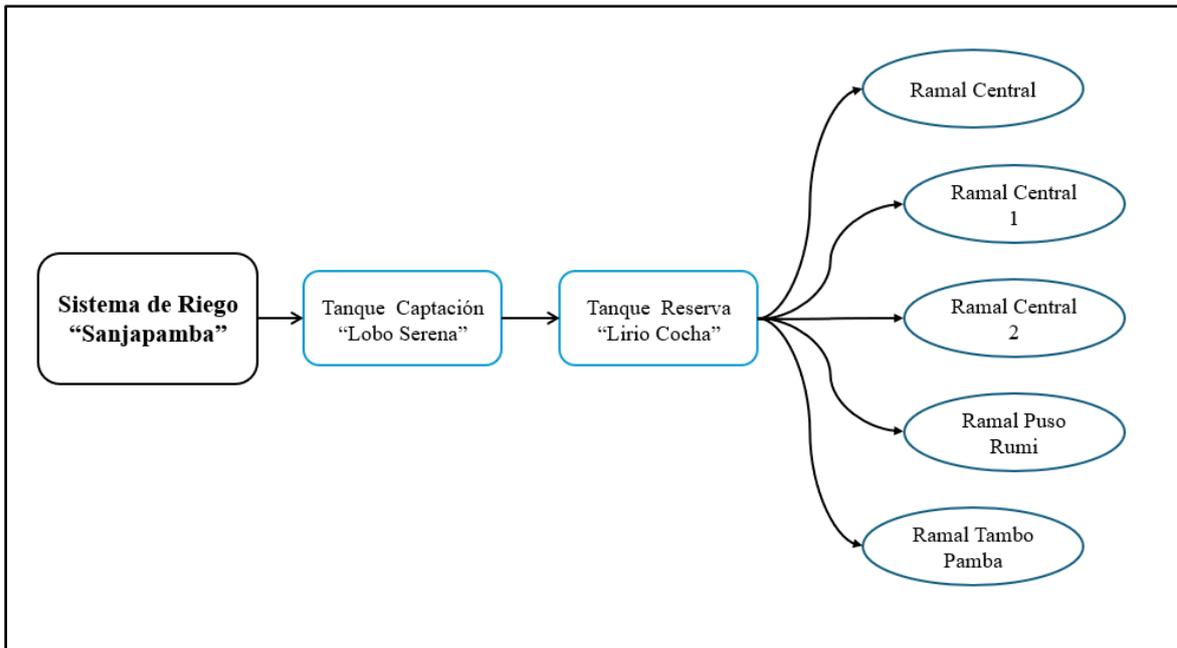


Figura 7. Esquema distribución de ramales

Fuente: Elaboración propia

1.3.3 Topografía general de la zona

El sistema de conducción del agua atraviesa terrenos caracterizados por la presencia de pajonales y vegetación típica del ecosistema de páramo, como se ilustra en la Figura 8. En su recorrido, el flujo se transporta a través de acequias y quebradas de pequeño caudal, lo que ha requerido la construcción de pasos elevados. Para garantizar la estabilidad y funcionalidad de estas estructuras, se han implementado soluciones en acero, adaptadas a las condiciones topográficas y a los retos hidráulicos del entorno.



Figura 8. Topografía de conducción

Fuente: Elaboración propia

1.4 Planteamiento del Problema

El análisis de desempeño actual y de diseño de un sistema de riego por aspersión es una preocupación notable en el campo de la agricultura y la gestión sostenible del agua. A medida que la demanda de alimentos sigue aumentando debido al crecimiento de la población, la eficiencia en el uso del agua en la agricultura se vuelve crucial. Los sistemas de riego por aspersión se consideran una de las tecnologías más efectivas para entregar agua a los cultivos de manera uniforme. Sin embargo, existen desafíos significativos con relación a su diseño y funcionamiento óptimos (Valencia, 2015).

El problema radica en la disparidad entre el diseño teórico de un sistema de riego por aspersión y su desempeño actual en el campo. A pesar de las especificaciones técnicas y los cálculos precisos en la fase de diseño, muchos sistemas enfrentan dificultades para cumplir con las expectativas de eficiencia en el suministro de agua. Esto genera problemas como la subutilización de recursos hídricos, costos operativos elevados y, principalmente, la posibilidad de afectar la calidad y cantidad de la cosecha.

El análisis de desempeño de los sistemas de riego por aspersión se convierte en una problemática crucial, que involucra aspectos técnicos, climáticos y económicos. La falta de uniformidad en la distribución del agua, el desgaste de los componentes del sistema, la variabilidad climática y la falta de mantenimiento adecuado son algunos de los factores que contribuyen a esta variabilidad entre el diseño y el desempeño actual.

El proyecto de investigación tiene el objetivo de determinar la eficiencia del uso de agua en un sistema de riego por aspersión. Este análisis genera una interrogante fundamental: ¿Cuáles son las principales diferencias entre el desempeño actual del sistema de riego y las condiciones establecidas en su diseño hidráulico?

1.5 Justificación

La ejecución de un estudio detallado acerca del comportamiento hidráulico y el desempeño del sistema de riego por aspersión en una comunidad nace como una necesidad crítica en la búsqueda de una gestión eficiente del agua y la agricultura sostenible. Al realizar dicho análisis permitirá comprender claramente como el sistema interactúa en su entorno, identificando posibles puntos de optimización con la finalidad de aumentar su eficiencia y productividad.

Al analizar el comportamiento hidráulico se podrá evaluar la distribución del agua a lo largo del área de riego garantizando una cobertura uniforme y evitando la pérdida de recursos. De igual manera, al estudiar el desempeño del sistema de riego se podrán localizar posibles

deficiencias técnicas o áreas de mejora que puedan afectar tanto la productividad agrícola como la sostenibilidad a lo largo de la vida útil del proyecto.

La metodología está basada en la recolección de datos específicos y observaciones experimentales garantizando así una adecuada toma de decisiones y permitiendo realizar ajustes específicos que optimicen el uso del agua y aumente la productividad de los cultivos.

1.6 Objetivos

1.6.1 General

- Determinar el comportamiento hidráulico y desempeño del sistema de riego por aspersión en la comunidad Sanjapamba – Parroquia San Andrés.

1.6.2 Específicos

- Recopilar información detallada del sistema de riego por aspersión ubicado en la comunidad Sanjapamba.
- Desarrollar un modelo matemático que permita realizar una comparación entre el desempeño actual y el diseño del sistema de riego, identificando relaciones, tendencias o diferencias significativas.
- Evaluar el desempeño actual de un sistema de riego mediante el análisis de las presiones de agua en diferentes puntos del sistema, con el fin de optimizar su desempeño.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Conceptos Generales

2.1.1 Sistemas de riego

Un sistema de riego es un conjunto de componentes, dispositivos y tecnologías diseñados para proporcionar de manera controlada y eficiente la cantidad necesaria de agua a los cultivos, jardines u otras áreas verdes. Estos sistemas se utilizan para mantener la humedad del suelo y satisfacer las necesidades hídricas de las plantas, contribuyendo al crecimiento, desarrollo y salud de los cultivos. Los sistemas de riego pueden variar en complejidad, desde simples mangueras y aspersores manuales hasta sistemas automatizados altamente sofisticados que utilizan sensores y programación para entregar agua de manera precisa y en momentos específicos. La elección del sistema de riego adecuado depende de diversos factores, como el tipo de cultivo, las condiciones climáticas, el acceso al agua y las consideraciones de eficiencia en el uso del recurso hídrico (Vásquez, 2013).

2.1.2 Red de distribución de riego

Una red de distribución de riego es el sistema de tuberías, válvulas y emisores que transporta y distribuye agua desde la fuente o estación de bombeo hasta las zonas agrícolas (Figura 9). Este sistema está diseñado para cumplir con las necesidades hídricas específicas de los cultivos, garantizando una aplicación eficiente y uniforme del agua, con la mínima pérdida por filtraciones o evaporación. Las redes de distribución pueden variar en su complejidad, desde sistemas presurizados como el riego por aspersión y goteo, hasta redes de flujo libre en sistemas por gravedad. Para su diseño, es crucial considerar factores como la topografía, las características del suelo, la demanda hídrica de los cultivos, la disponibilidad de agua y los requerimientos de presión. La correcta planificación y diseño de una red de distribución eficiente puede mejorar la productividad agrícola y reducir el consumo de agua (Pereira, Paredes, Rodrigues, & Neves, 2020).

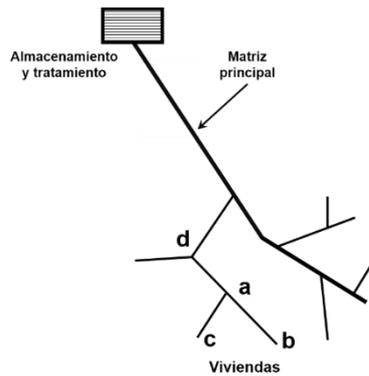


Figura 9. Red de distribución ramificada

Fuente: (USAID, 2016)

2.1.3 Orígenes y principales tipos de riego

Existen varios tipos de sistemas de riego, cada uno con características y aplicaciones específicas. A continuación, se describen algunos de los sistemas de riego más comunes:

- **Riego por goteo:** Denominado también como riego gota a gota. Esta clase de riego es utilizada en zonas en las que el agua escasea y optimiza ese recurso de una manera considerable. La idea de funcionamiento es distribuir el agua a través de goteros, que humedecerán la zona de las raíces de cada una de las plantas. El agua es conducida a través de tuberías y posteriormente a través de cintillas de riego, que cuenta con agujeros diseñados específicamente para distintos tipos de consumos de agua (AQUAE FUNDACIÓN, 2023).
- **Riego por aspersión:** Es uno de los múltiples métodos de riego de cultivos que existen en la actualidad. Consiste en aplicar el agua imitando la lluvia, es decir, mediante un chorro de agua pulverizada en gotas. El mecanismo funciona a través de una red de tuberías que transporta el agua hasta los aspersores, los cuales utilizan presión para dispararla. El riego como tal es potenciado a través de un sistema de bombeo (AGROPINOS, 2022).

Cada tipo de sistema de riego tiene sus propias ventajas y desventajas, y la elección del sistema adecuado depende de factores como el tipo de cultivo, las condiciones climáticas, la disponibilidad de agua y los recursos financieros.

2.1.4 Riego por Aspersión

2.1.4.1 Funcionamiento

Funciona principalmente por:

- Facilidad en adaptarse de manera efectiva a diferentes cantidades de agua para el riego.
- Automatización hidráulica para la cosecha.
- Posibilitar el tratamiento con fertilizantes, fitosanitarios y anti-heladas.
- Aumentar la disponibilidad de agua para mantener los cultivos en condiciones óptimas.

Además, es fundamental comprender que el agua utilizada para el riego de plantas y otros cultivos puede provenir de diversas fuentes, como pozos, ríos o lagos. Por lo tanto, se emplea una estructura que facilita el almacenamiento del agua, asegurando su distribución de manera eficiente. Este sistema es aplicable tanto en terrenos extensos como en áreas más pequeñas (Morales, 2019).

2.1.4.2 Tipos

Existe una variedad de sistemas de riego por aspersión disponibles, adaptados a las particularidades de cada área de producción. A continuación, se detallan los siguientes:

- **Convencionales:** Son los primeros que se desarrollaron y durante mucho tiempo fueron los más comunes. Existen dos categorías de sistemas de aspersión convencionales:
 - **Sistema de riego fijo:** Son aquellos en los que los aspersores se encuentran en una posición estable. En cuanto al sistema de tuberías, este puede estar enterrado en el suelo o situarse en la superficie. Sin embargo, es crucial que haya una estructura con la altura adecuada para incorporar el aspersor.
 - **Sistema de riego semifijo:** Son aquellos que se mueven de una zona a otra, ya sea de forma manual o mediante un desplazamiento mecanizado que permite cambiar el sistema de manera ágil.
- **Auto mecanizados:** Se caracterizan por incorporar motores eléctricos o sistemas hidráulicos que permiten el desplazamiento automático a lo largo del área de cultivo. Este tipo de sistemas incluye sistemas pivotantes, sistemas de desplazamiento lateral, carros de riego y algunas máquinas regadoras.

2.1.5 Modelo matemático hidráulico

Es aquella representación matemática de un sistema hidráulico o fluido dinámico que se utiliza para predecir y analizar el comportamiento de dicho sistema. Estos modelos se emplean en ingeniería y ciencias relacionadas con fluidos para entender cómo los fluidos (como agua,

aceite, aire, etc.) fluyen a través de tuberías, canales, bombas, válvulas y otros componentes. Un modelo matemático hidráulico típicamente incluye ecuaciones diferenciales parciales que describen las leyes fundamentales de la hidrodinámica. Estas ecuaciones se adaptan a las condiciones específicas del sistema en cuestión y se resuelven utilizando métodos numéricos (Contreras, 2017).

Los modelos matemáticos hidráulicos son valiosos para predecir cómo se comportará un sistema en diferentes situaciones, lo que puede ser útil en la planificación y diseño de sistemas de suministro de agua, sistemas de alcantarillado, sistemas de irrigación, sistemas de refrigeración, entre otros. También son importantes en la gestión de recursos hídricos y en la predicción de inundaciones y otros eventos relacionados con el agua (Ortiz, 2017).

2.1.6 Métodos de optimización

Al abordar la resolución de problemas de optimización, es posible clasificar las técnicas en dos grandes categorías, de acuerdo con la clasificación propuesta por Ramos et al. (2010):

- a) **Métodos clásicos de optimización.** Incluyen técnicas analíticas y numéricas que buscan soluciones exactas bajo condiciones específicas, como la programación lineal o el gradiente descendente. Son efectivos para problemas simples o bien estructurados, pero pierden eficacia en problemas complejos o no lineales.
- b) **Métodos meta-heurísticos.** Vinculados a la inteligencia artificial, emulan fenómenos naturales como la evolución o el comportamiento de enjambres. Ejemplos incluyen algoritmos genéticos o de optimización por enjambre de partículas. Son útiles para problemas complejos y ofrecen soluciones cercanas al óptimo, aunque no siempre garantizan exactitud.

2.2 Estado del Arte

La gestión sostenible, eficaz y equitativa de los recursos hídricos constituye un desafío clave para los próximos cien años, debido a que el consumo de agua se ha incrementado en el doble de la población mundial durante el presente siglo (Lapo, 2012).

La actividad agrícola es el principal consumidor del agua, por lo que se deben tomar medidas para ser más eficientes en su uso (Castro et al., 2008). La superficie cultivada en el mundo es aproximadamente de 1 527 millones de hectáreas, de las cuales 19.7% corresponde a la agricultura bajo riego (FAO, 2013).

La relevancia del riego en Ecuador se destacó a mediados de los años ochenta, debido a las lluvias, inundaciones y la severa sequía en la sierra, causadas por el fenómeno de El Niño en 1983. Un sistema de riego es un complejo mecanismo de control del agua que integra elementos

físicos, normativos, organizativos y agro-productivos. Considerando todos estos factores, se puede lograr un sistema de riego por aspersión más eficiente, cuyo objetivo, al igual que cualquier método de riego, es llevar el agua desde la fuente hasta la zona de riego y aplicarla en las parcelas y cultivos (Salazar & Apugllón, 2019).

Naroua, Rodríguez Sinobas, Sánchez Calvo y Rodríguez Ros (2012) realizaron una evaluación de campo en trece sistemas de riego por aspersión, analizando la carta de riego propuesta por los fabricantes y determinando la uniformidad de distribución de agua mediante el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CU). Los resultados mostraron que el 38% de los sistemas presentaban una mala uniformidad en la aplicación del agua ($CU < 80$). Asimismo, en el 31% de los sistemas evaluados, el rendimiento de aplicación (R_a) fue inferior al requerido ($R_a < 0,75$), y el 92% de los sistemas resultaron insuficientes para satisfacer las necesidades de riego. Además, la uniformidad de aplicación del agua calculada a partir de las cartas de riego sugeridas por los fabricantes también arrojó valores de $CU < 80$. Se estimó que el cambio de boquillas propuesto podría mejorar la uniformidad en la mayoría de los sistemas analizados.

De igual manera en el XV Seminario Iberoamericano de Redes de Agua y Drenaje (SEREA, 2017) se aplicó una metodología basada en una estrategia híbrida de optimización que utiliza Programación No Lineal (PNL) y Algoritmos Genéticos (AGs). Esta técnica se aplicó a una red de riego en Ecuador para evaluar su efectividad. Además, es importante mencionar que la investigación contempla como variables de decisión la asignación de turnos a los hidrantes de riego y el dimensionamiento de las conducciones, con el objetivo de disminuir los costos de implementación del sistema. Los resultados demostraron que la asignación de turnos es crucial para reducir los costos de inversión en tuberías. Además, se realizó un análisis de sensibilidad de los operadores genéticos para determinar la respuesta del modelo. Para ello, se adaptaron valores de operadores de investigaciones previas, con el fin de verificar la eficacia del enfoque de optimización.

Finalmente, Urrego (2013) menciona que, en el riego por aspersión, una parte del agua emitida por los aspersores se pierde por evaporación y arrastre durante el riego. Además, después del riego, el agua que queda en la superficie del cultivo también se evapora. Estas pérdidas de agua alteran el microclima en el que crecen las plantas, causando cambios fisiológicos en ellas. La eficiencia de la aplicación del agua de riego se determina tanto por estas pérdidas de agua como por la uniformidad del riego y la respuesta productiva del cultivo.

CAPÍTULO III. METODOLOGIA

3.1 Tipo de Investigación

Para la ejecución de la presente investigación se posee un enfoque mixto, es decir cuantitativo y cualitativo, donde la parte cuantitativa hace énfasis a la recolección y posterior análisis de datos tanto para los respectivos cálculos hídricos como también para la ejecución de un modelo matemático “EPANET” con el fin de analizar el comportamiento hidráulico del sistema de riego, mientras que la parte cualitativa se llevará a cabo durante las visitas de campo para recolectar información y validarla con los resultados del modelo matemático, la cual nos permitirá conocer el estado y características del sistema de riego, operaciones y mantenimientos de este. Además, el tipo de investigación es de carácter no experimental, ya que se basa en la observación y análisis de datos existentes sin intervención o manipulación de las variables del sistema de riego, permitiendo evaluar su desempeño actual respecto al diseño sin alterar las condiciones operativas del objeto de estudio.

A continuación, la Figura 10 detalla la metodología para cumplir con los objetivos planteados para la investigación:



Figura 10. Metodología del proyecto de investigación

Fuente: Elaboración propia

3.2 Recolección de información y documentación

Para llevar a cabo el desarrollo de esta investigación, es importante el apoyo de la entidad encargada de la administración, que en este caso es el GAD Provincial de Chimborazo y el Directorio encargado del sistema de riego en la comunidad de Sanjapamba.

Con este fin, se remitió un oficio a las entidades responsables del sistema de riego, solicitando la información que se muestra a continuación:

- Planos de la red del sistema por aspersión
- Planos de conducción red Sanjapamba
- Planos tanque de reserva
- Estudio del sistema de riego de Sanjapamba
- Diseños y cálculos hidráulicos
- Especificaciones y memoria técnica Sanjapamba
- Registro de usuarios por ramales Sanjapamba
- Datos topográficos de conducción y distribución Sanjapamba

3.3 Población de estudio y tamaño de muestra

La población de estudio hace referencia a los usuarios registrados en la entidad encargada de suministrar el servicio de agua de riego (Directorio Sistema de Riego) en la comunidad de Sanjapamba. Para lo cual se tomó información brindada por parte de la entidad mencionada, en donde se registra un total de 105 beneficiarios.

3.4 Identificación de áreas y aspersores

Es importante mencionar que el procedimiento aplicado en la selección de áreas y aspersores se lo realiza a partir del reconocimiento de cada una de las líneas y los horarios designados a su funcionamiento, es por esto que se ha optado elegir un mínimo de cuatro aspersores por cada línea con su respectiva área de riego. En algunos casos el número de aspersores supera a la cantidad mínima por línea debido a la topografía y la variabilidad de presiones existentes en las áreas de estudio.

3.5 Toma de presiones en aspersores

Para la toma de datos se ha utilizado como equipo principal un manómetro de glicerina, con el cual se ha tomado las presiones existentes en cada uno de los aspersores seleccionados anteriormente. Además, con la ayuda de una cinta métrica se ha medido los radios de alcance de riego que tienen los aspersores en cada una de sus áreas. Este proceso se lo realizó tres veces,

es decir, por cada aspersor se tiene tres tomas de datos tanto de presión como radio de alcance con la finalidad de conocer y evaluar el comportamiento hidráulico que tienen en diferentes días. Los datos obtenidos han sido registrados en una hoja de Excel con el objetivo de obtener el valor promedio de las presiones que se han tomado en campo:

Tabla 1. Toma de medida de presión en aspersores

Aspersor	Presión Actual Promedio [mca]	Presión de Diseño [mca]	Radio Alcance Promedio [m]	Fotografía in situ
1	21.67	15.44	11.88	
2	19.33	21.02	9.87	
3	30.00	30.58	15.97	
4	27.86	35.19	15.33	

5	31.67	37.82	16.40	
6	31.33	41.53	16.27	
7	21.67	45.47	11.57	
8	23.00	46.49	12.17	
9	30.00	8.46	15.90	
10	30.67	14.28	16.17	

11	26.67	21.75	14.80	
12	32.00	15.47	16.75	
13	30.33	3.99	15.73	
14	29.00	12.85	15.53	
15	30.00	13.50	15.37	
16	23.67	13.60	11.83	

17	17.67	10.33	9.57
----	-------	-------	------



Fuente: Elaboración propia

Para una representación más detallada de la ubicación de los aspersores y el análisis de sus datos en función de la topografía, se ha diseñado un modelo del sistema de riego, el cual se encuentra documentado en la sección de anexos del presente informe.

3.6 Estimación del caudal in situ (Método de aforo en aspersores)

El método de aforo consiste en la medición del caudal de un cuerpo de agua mediante la determinación directa del volumen de agua que fluye por unidad de tiempo. En el presente caso, se ha aplicado en las salidas de los aspersores y en los puntos de recolección de los tanques “Lobo Serena” y “Lirio Cocha”, como se evidencia en las Figuras 11 y 12. Esta metodología es crucial en la gestión de recursos hídricos, ya que permite cuantificar con precisión el flujo de agua disponible en un momento específico, lo que es esencial para la evaluación del rendimiento y el balance hídrico.

El proceso de aforo se lleva a cabo utilizando un recipiente volumétrico como dispositivo de medición. Este se posiciona en los puntos de salida del flujo (aspersores, tanques de almacenamiento) y, mediante el uso de un cronómetro, se registra el tiempo necesario para llenar el recipiente. El caudal se calcula como la relación entre el volumen capturado y el tiempo medido, utilizando la ecuación (1).

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

Donde, Q es el caudal, V es el volumen y t es el tiempo.

Para obtener un valor promedio representativo del caudal, es recomendable realizar múltiples mediciones bajo distintas condiciones y en diferentes momentos. Esta repetición reduce el impacto de fluctuaciones transitorias y asegura una estimación más precisa y confiable del caudal promedio.



Figura 11. Método de aforo en aspersores

Fuente: Elaboración propia



Figura 12. Método de aforo en reservorio "Lirio Cocha"

Fuente: Elaboración propia

A continuación, la Tabla 2 presenta el resumen de los datos obtenidos en campo acerca del procedimiento de medición de caudales a partir de la ejecución del método de aforo in situ:

Tabla 2. Resultados de estimación de caudales mediante el Método de Aforo

Aspersor	Tiempo Llenado [s]			Promedio Tiempo [s]	Volumen [l]	Q[l/s]
	Toma 1	Toma 2	Toma 3			
1	13.22	13.45	13.25	13.31	8.00	0.60
2	15.11	15.64	15.33	15.36	8.00	0.52
3	8.89	8.72	8.93	8.85	8.00	0.90
4	10.15	10.68	10.39	10.41	8.00	0.77
5	9.25	9.76	9.43	9.48	8.00	0.84
6	10.11	11.58	10.67	10.79	8.00	0.74

7	11.59	11.12	11.34	11.35	8.00	0.70
8	12.32	12.88	12.67	12.62	8.00	0.63
9	12.82	12.61	12.21	12.55	8.00	0.64
10	15.20	14.82	15.39	15.14	8.00	0.53
11	11.22	11.13	11.22	11.19	8.00	0.71
12	9.16	9.23	9.19	9.19	8.00	0.87
13	14.05	14.35	14.50	14.30	8.00	0.56
14	13.87	14.02	13.90	13.93	8.00	0.57
15	15.21	15.78	15.23	15.41	8.00	0.52
16	10.77	10.59	10.35	10.57	8.00	0.76
17	10.11	10.35	10.77	10.41	8.00	0.77

Fuente: Elaboración propia

3.7 Análisis y procesamiento de datos

A partir de las mediciones de presión realizadas en puntos clave del sistema de riego, se elaboró una tabla resumen que presenta los valores promedios de presión y el radio de alcance de los aspersores en tres series de mediciones. Estas mediciones permitieron caracterizar el perfil de presión en la red, proporcionando datos para analizar gradientes de presión y posibles pérdidas de carga. Los valores promedios se obtuvieron mediante múltiples registros bajo condiciones hidráulicas controladas y estables, a fin de minimizar la dispersión de los datos y mejorar la precisión estadística. Este análisis es fundamental para evaluar la eficiencia hidráulica del sistema y la uniformidad en la distribución del riego, factores esenciales para garantizar un desempeño óptimo.

Tabla 3. Línea 3 - Ramal Puso Rumi

Aspersor	Presión [mca]	Diámetro Alcance [m]	Diagrama Variación de Presiones
1	30.00	15.97	
2	27.86	15.33	
3	31.67	16.40	
4	31.33	16.27	
5	21.67	11.57	
6	23.00	12.17	
7	21.67	11.88	
8	19.33	9.67	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Línea 2 - Ramal Central 1

Aspersor	Presión [mca]	Diámetro Alcance [m]	Diagrama Variación de Presiones
1	26.67	14.80	
2	30.67	16.17	
3	30.00	15.90	
4	30.33	15.73	
5	29.00	15.53	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Línea 1 - Ramal Central

Aspersor	Presión [mca]	Diámetro Alcance [m]	Diagrama Variación de Presiones
1	32.00	16.75	
2	17.67	9.57	
3	23.67	11.83	
4	30.00	15.37	

Fuente: Elaboración propia

Las Tablas 3 ,4 y 5 muestran la presión y diámetro de alcance promedio de los aspersores ubicados en sus respectivos ramales, deduciendo que:

- A medida que la presión aumenta, el diámetro necesario para mantener el flujo adecuado también tiende a aumentar.
- La presión más alta empuja el fluido a una mayor distancia, incrementando el alcance del sistema de riego.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Modelo hidráulico

Para el desarrollo del modelo hidráulico del sistema de riego, se utilizó el software de simulación EPANET, herramienta especializada en el análisis de redes de distribución de agua. En el modelo se representaron todos los elementos del sistema, incluyendo nodos, tuberías, tanques y válvulas, siguiendo la configuración existente en el sistema a evaluar.

El primer paso en la construcción del modelo fue la georreferenciación del área de estudio. Para ello, se integraron las coordenadas UTM de cada nodo, así como su elevación sobre el nivel del mar. Además, en los nodos correspondientes, se introdujeron los caudales asociados a las demandas del sistema. En cuanto a los elementos lineales, como tuberías y conexiones, se ingresaron parámetros clave como la longitud, diámetro, coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams, y demandas de caudal en los puntos de interés.

La Figura 13 ilustra el reservorio de almacenamiento, donde se especificaron las coordenadas y su elevación, permitiendo así la correcta representación espacial de los componentes del sistema. Estos datos son fundamentales para realizar simulaciones precisas del comportamiento hidráulico bajo diferentes escenarios de operación y demanda.

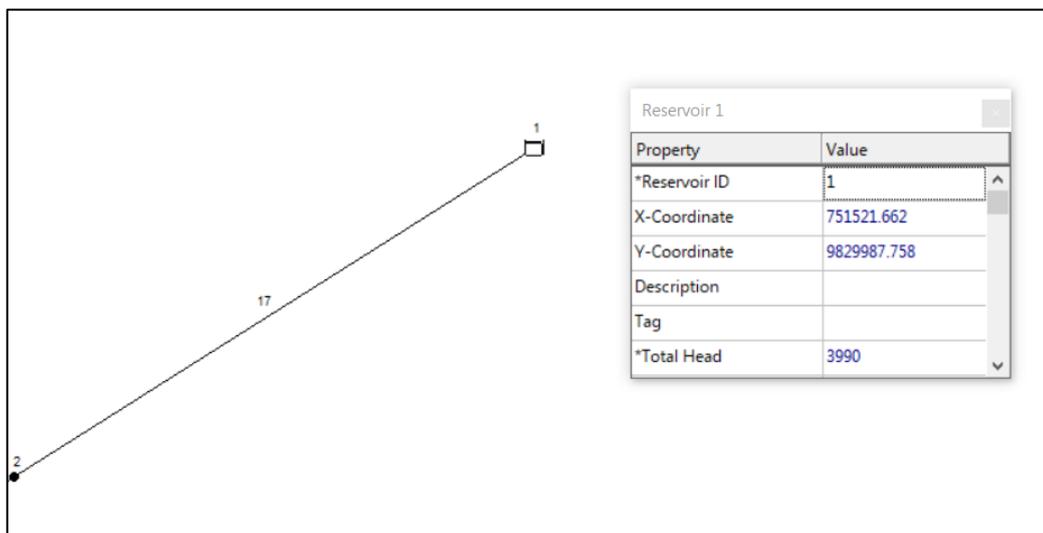


Figura 13. Simulación de reservorio en "EPANET"

Fuente: Elaboración propia

En el contexto de los nodos del sistema de riego, como se ilustra en la Figura 14, se registraron las coordenadas UTM y la elevación correspondiente de cada punto. Para los nodos representativos de los aspersores, se incorporaron los caudales de aforo medidos in situ, reflejando las condiciones operativas actuales del sistema. En contraste, para el modelo de diseño, se ingresaron los caudales calculados, que corresponden a los parámetros teóricos del

sistema propuesto. Esta diferenciación permite evaluar el desempeño hidráulico del sistema en condiciones reales y compararlo con el rendimiento esperado según el diseño, facilitando así el análisis de eficiencia y cobertura del riego.

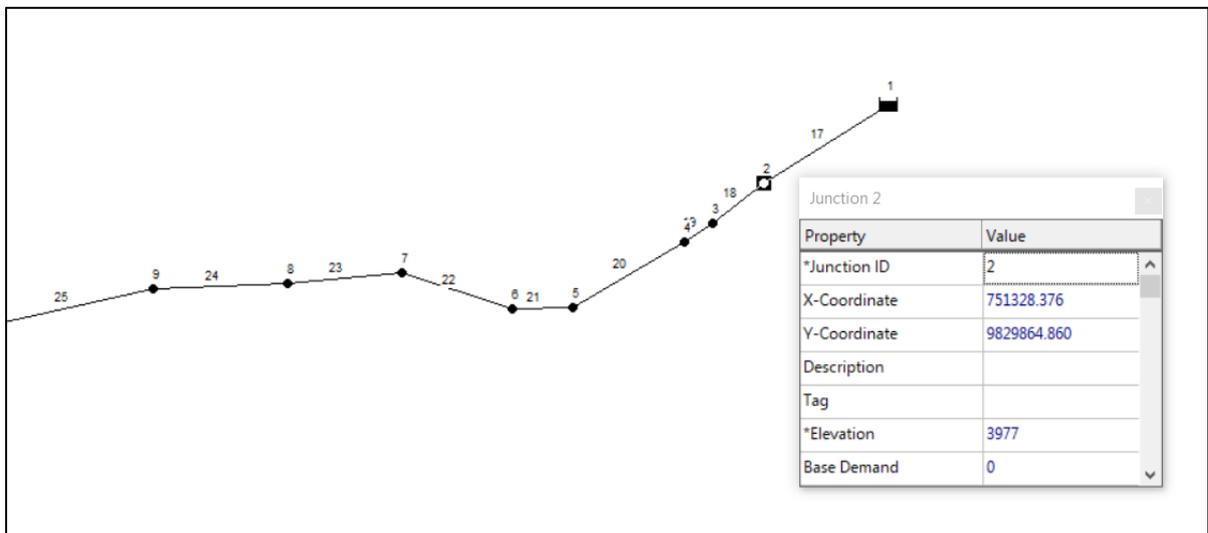


Figura 14. Simulación de nodos en "EPANET"

Fuente: Elaboración propia

La Figura 15 presenta una tubería que constituye una conexión física entre dos nodos, diseñada para facilitar el transporte del flujo de agua dentro del sistema de riego. Para la simulación hidráulica, se han especificado diversos parámetros hidráulicos.

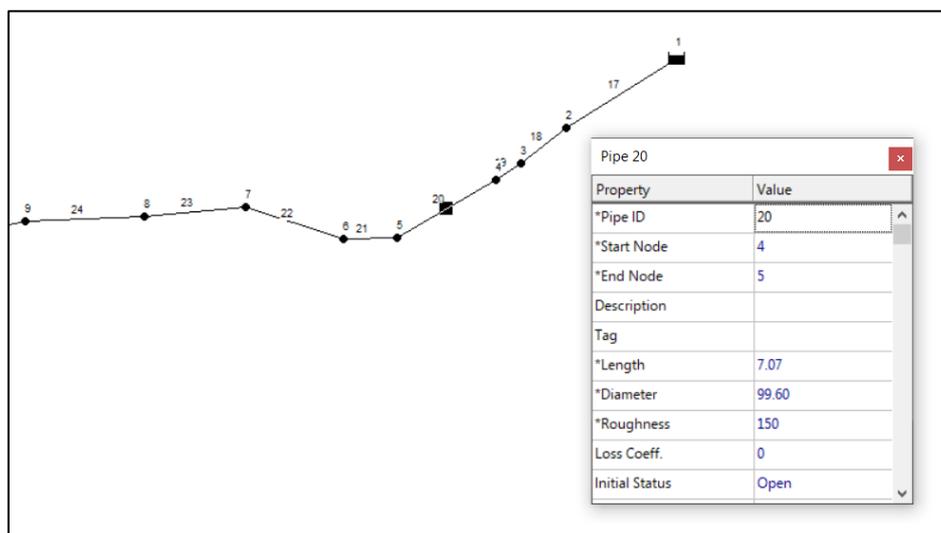


Figura 15. Simulación de tuberías en "EPANET"

Fuente: Elaboración propia

El sistema de riego incluye válvulas reductoras de presión, como se muestra en la Figura 16. Para estos componentes, se registraron datos específicos sobre el diámetro y el tipo de válvula. Es importante señalar que se simuló el comportamiento de las válvulas del sistema, teniendo en cuenta sus características físicas reales instaladas.

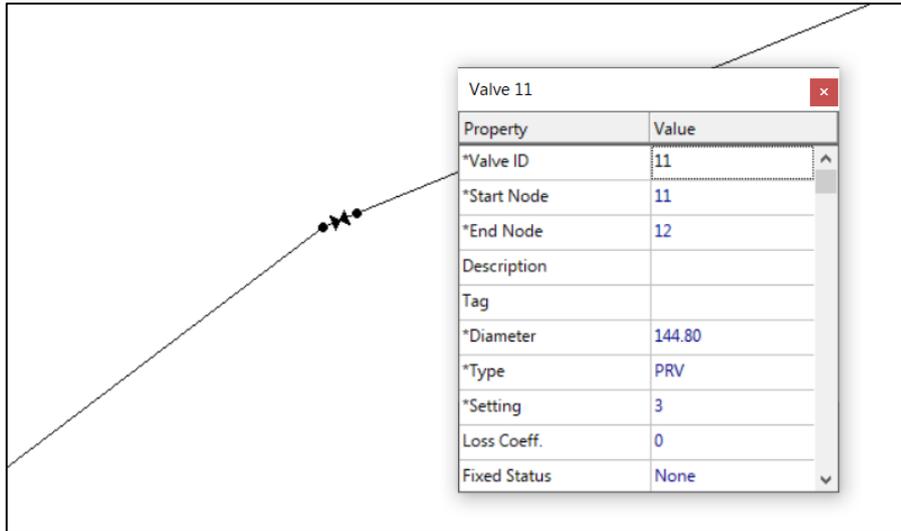


Figura 16. Simulación de válvulas en "EPANET"

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la Figura 17 muestra las características hidráulicas que va a tener el sistema en general, tales como unidades, fórmula de pérdida de carga, etc.

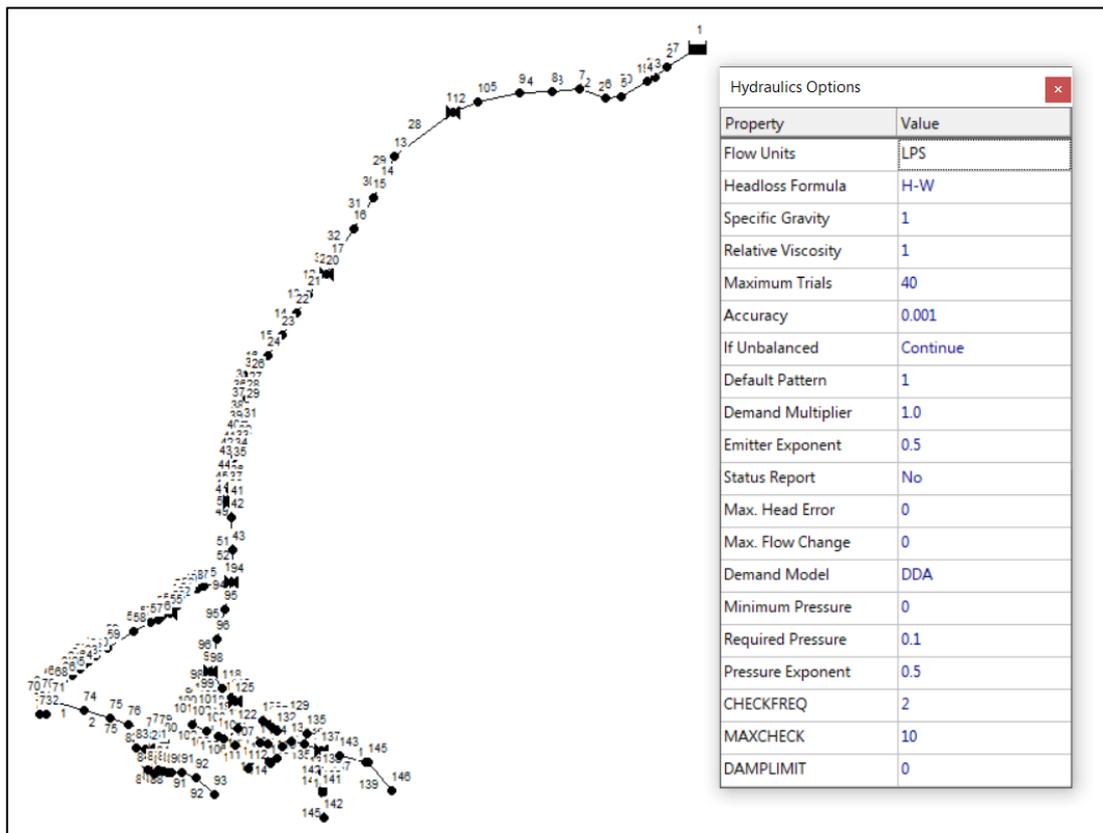


Figura 17. Opciones hidráulicas en "EPANET"

Fuente: Elaboración propia

4.2 Resultados generales

Concluida la configuración de propiedades y el armado del modelo hidráulico para el sistema actual y el de diseño, se alcanzaron los siguientes resultados:

La Figura 18 muestra el modelo completo del sistema de riego diseñado y simulado en EPANET. En la figura, los nodos de color rojo representan los aspersores del sistema. Además, se visualiza la configuración detallada de la red de distribución de agua, con sus principales componentes: tuberías, nodos, válvulas y fuentes de abastecimiento.

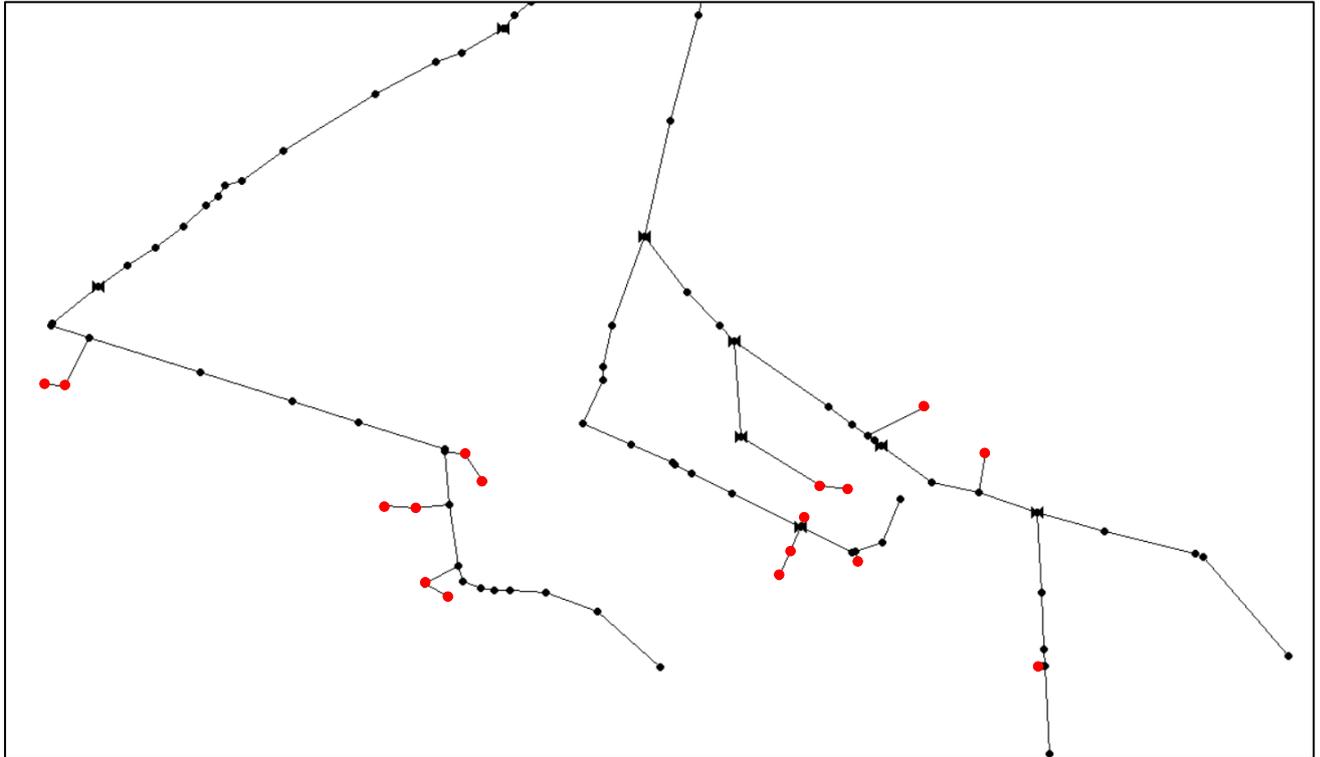


Figura 18. Sistema de riego simulado en "EPANET"

Fuente: Elaboración propia

En las Figuras 19 y 20 se presenta la distribución de velocidades obtenidas en la simulación del sistema de riego actual y de diseño respectivamente. Cada segmento de la red, representado en el diagrama, refleja las velocidades de flujo en las distintas tuberías, esto facilita el análisis del comportamiento hidráulico bajo diversas condiciones operativas.

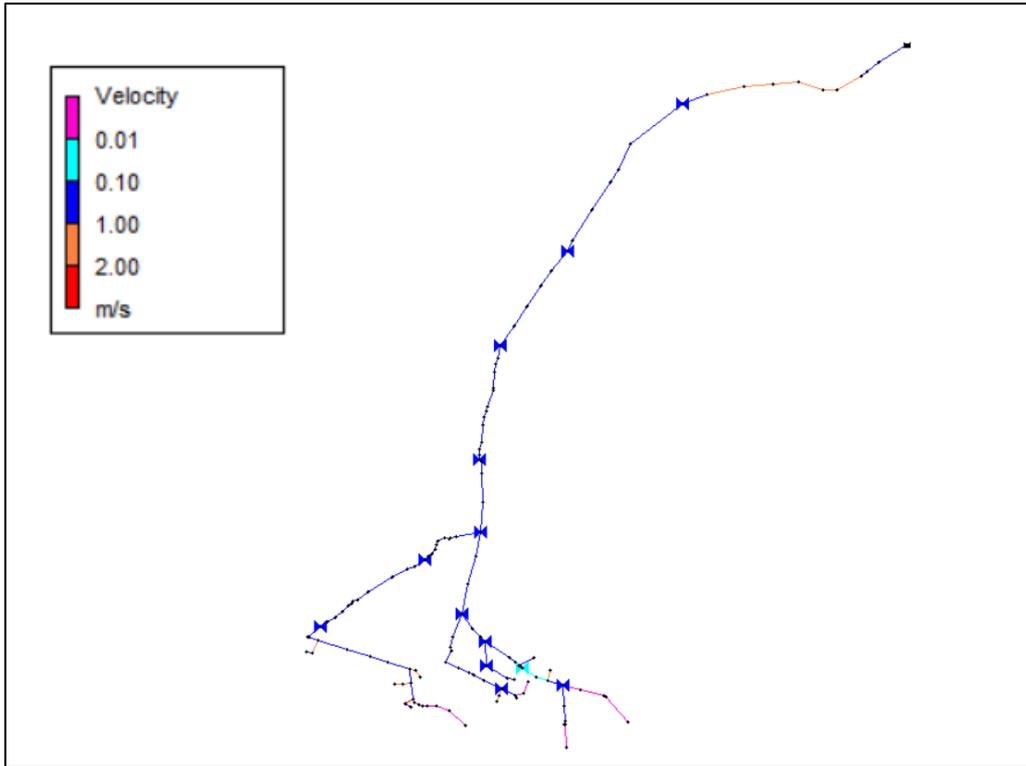


Figura 19. Velocidades del sistema de riego “Actual”

Fuente: Elaboración propia

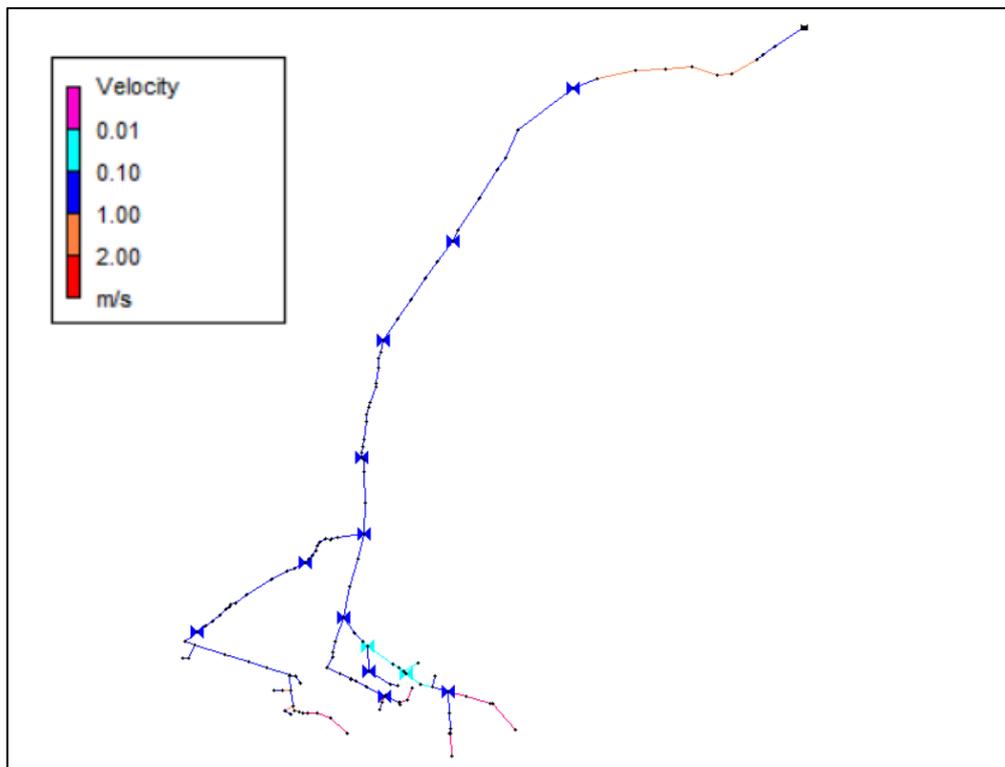


Figura 20. Velocidades del sistema de riego “Diseño”

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, se han registrado y analizado las distribuciones de presión a lo largo del sistema de riego simulado, tal como se representa en las Figuras 21 y 22.

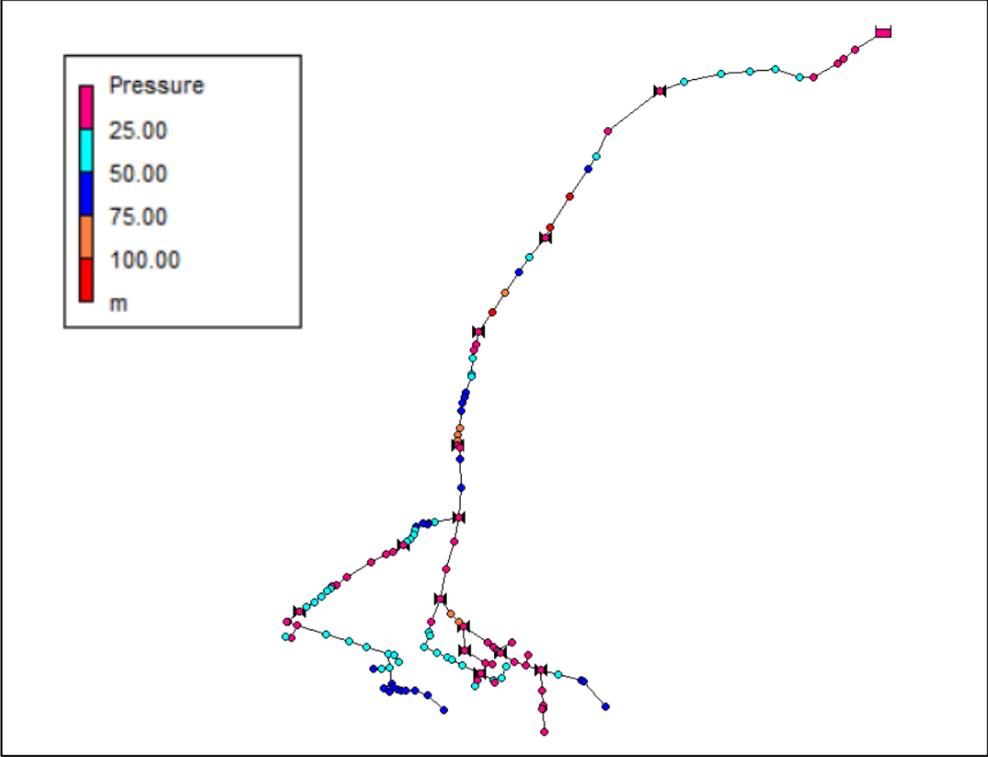


Figura 21. Presiones del sistema de riego “Actual”

Fuente: Elaboración propia

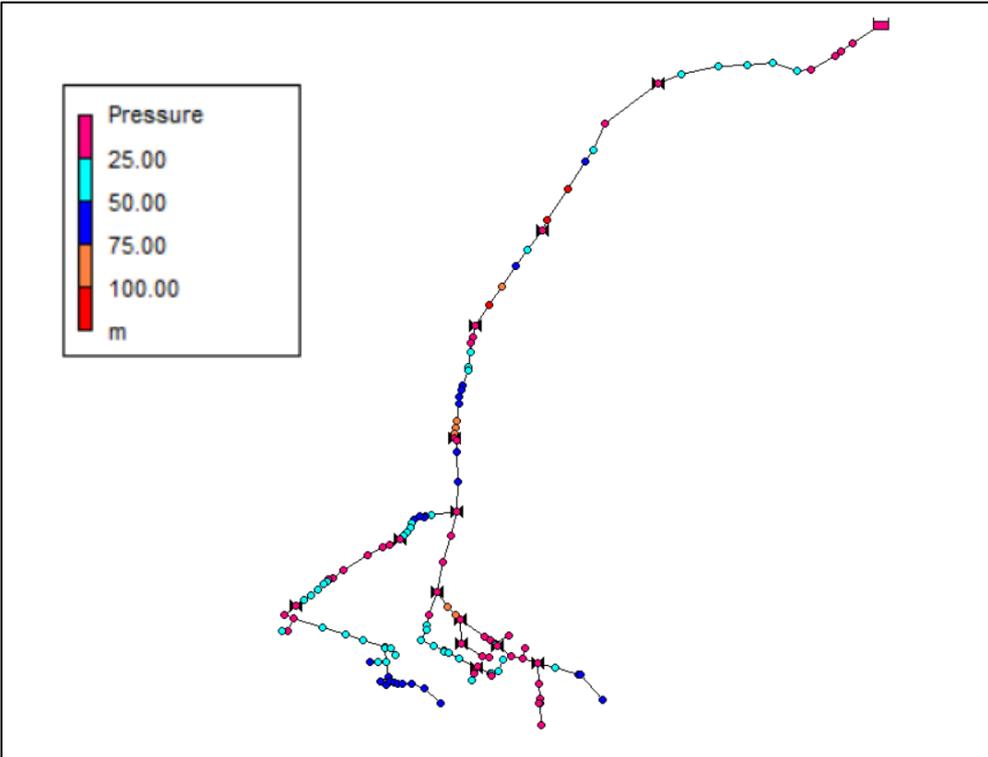


Figura 22. Presiones del sistema de riego “Diseño”

Fuente: Elaboración propia

Las Tablas 6 y 7 sintetizan los resultados clave obtenidos del sistema de riego simulado. En ellas se especifican parámetros hidráulicos críticos, tales como los caudales en cada nodo, presiones en los puntos de control, velocidades del flujo en las tuberías, y otros datos relevantes para el análisis integral del desempeño de la red. Estos resultados permiten identificar patrones de comportamiento hidráulico, evaluar la eficiencia en la distribución del agua y detectar posibles ineficiencias o puntos críticos en la operación del sistema bajo distintas condiciones de demanda.

Tabla 6. Resultados modelo hidráulico "Actual"

	Identificación Nodo	Demanda [l/s]	Elevación [m]	Presión [mca]	Identificación Tubería	Caudal [l/s]	Velocidad [m/s]
Accesorios	N 02	-	3989.94	12.94	T 17	11.63	0.71
	N 05	-	3989.79	20.79	T 20	11.63	1.49
	N 41	-	3568.92	20.92	T 49	11.63	0.71
	N 44	-	3568.67	44.67	T 52	11.63	0.71
	N 70	-	3495.98	17.98	T 70	5.7	0.35
	N 78	-	3495.95	31.35	T 77	4.58	0.88
	N 97	-	3526.96	35.96	T 96	5.93	0.36
	N 102	-	3493.95	27.95	T 101	2.75	0.35
	N 121	-	3526.89	27.39	T 120	1.13	0.22
Aspersores	N 72	0.6	3495.94	21.14	T 72	1.12	1.1
	N 73	0.52	3495.72	26.72	T 73	0.52	0.8
	N 79	0.9	3495.7	37.7	T 78	1.67	1.05
	N 80	0.77	3495.32	42.32	T 79	0.77	1.18
	N 82	0.84	3495.48	47.48	T 81	1.58	1.55
	N 83	0.74	3495.19	51.19	T 82	0.74	1.14
	N 85	0.7	3495.56	55.48	T 84	1.33	2.04
	N 86	0.63	3495.5	56.5	T 85	0.63	0.97
	N 110	0.64	3461.43	16.38	T 109	0.64	0.98
	N 111	0.53	3461.07	22.07	T 110	1.24	1.9
	N 112	0.71	3460.54	29.54	T 111	0.71	1.09
	N 115	0.87	3461.66	23.66	T 114	0.87	1.34
	N 123	0.56	3502.46	5.46	T 122	1.13	0.71
	N 124	0.57	3502.32	14.32	T 123	0.57	0.56
	N 129	0.52	3486	15	T 130	0.52	0.1
	N 135	0.76	3454.1	21.1	T 134	0.76	1.17
N 141	0.77	3433.81	16.81	T 144	0.77	1.18	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Resultados modelo hidráulico "Diseño"

	Identificación Nodo	Demanda [l/s]	Elevación [m]	Presión [mca]	Identificación Tubería	Caudal [l/s]	Velocidad [m/s]
Accesorios	N 02	-	3989.95	12.95	T 17	10.2	0.62
	N 05	-	3989.83	20.83	T 20	10.2	1.31
	N 41	-	3568.94	20.94	T 49	10.2	0.62

	N 44	-	3568.74	44.74	T 52	10.2	0.62
	N 70	-	3495.99	17.99	T 70	4.7	0.29
	N 78	-	3495.96	31.36	T 77	4.1	0.79
	N 97	-	3526.96	35.96	T 96	5.5	0.33
	N 102	-	3493.93	27.93	T 101	3.1	0.4
	N 121	-	3526.92	27.42	T 120	0.8	0.15
Aspersores	N 72	0.3	3495.97	21.17	T 72	0.6	0.59
	N 73	0.3	3495.89	26.89	T 73	0.3	0.46
	N 79	1	3495.78	37.78	T 78	1.4	0.88
	N 80	0.4	3495.67	42.67	T 79	0.4	0.61
	N 82	1.1	3495.54	47.54	T 81	1.5	1.47
	N 83	0.4	3495.45	51.45	T 82	0.4	0.61
	N 85	0.6	3495.64	55.56	T 84	1.2	1.84
	N 86	0.6	3495.58	56.58	T 85	0.6	0.92
	N 110	0.7	3461.29	16.24	T 109	0.7	1.07
	N 111	1.1	3460.18	21.18	T 110	1.7	2.61
	N 112	0.6	3459.79	28.79	T 111	0.6	0.92
	N 115	0.7	3461.84	23.84	T 114	0.7	1.07
	N 123	0.4	3502.48	5.48	T 122	0.8	0.5
	N 124	0.4	3502.41	14.41	T 123	0.4	0.39
	N 129	0.4	3486	15	T 130	0.4	0.08
N 135	0.6	3454.42	21.42	T 134	0.6	0.92	
N 141	0.6	3433.88	16.88	T 144	0.6	0.92	

Fuente: Elaboración propia

Además, se ha identificado que el sistema de riego utiliza un modelo de aspersor específico, el ASPERSOR 5035 RM 3/4", el cual opera a diferentes presiones de acuerdo con las especificaciones de su catálogo. Estas variaciones en presión permiten ajustar el rendimiento del aspersor, optimizando su funcionamiento según las necesidades del terreno y del cultivo, tal como se detalla a continuación:

Tabla 8. Características del Aspersor 5035 RM 3/4"

	Boquilla 3.2x2.5 RM 3/4"	Presiones de Trabajo		
	PSI	40	60	70
	m.c.a	28.16	42.24	49.28
	Caudal [GPM]	5.11	5.86	6.47
	Caudal [l/s]	0.322	0.369	0.408
	Diámetro a 0.50 m	26.50	27.50	27.50

Fuente: (GAD Provincial de Chimborazo, 2016)

4.3 Análisis de presiones y velocidades

La información presentada a continuación se ha organizado en gráficos de sectores, dividiendo los datos en tres categorías que representan los rangos de presión y velocidad establecidos en la ficha técnica del tipo de aspersor instalado. Este procedimiento se ha llevado a cabo con el objetivo de optimizar el análisis del rendimiento del sistema de riego, enfocándose específicamente en la distribución del agua y la eficiencia del flujo:

- **Presiones**

- Grupo 1: Rango de presiones entre 0 y 28.16 mca
- Grupo 2: Rango de presiones entre 28.17 y 42.24 mca
- Grupo 3: Rango de presiones entre 42.25 y 49.28 mca
- Grupo 4: Presiones mayores a 49.28 mca

- **Velocidades**

- Grupo 1: Rango de velocidades entre 0 y 0.50 m/s
- Grupo 2: Rango de velocidades entre 0.51 y 1.50 m/s
- Grupo 3: Rango de velocidades entre 1.51 y 2.50 m/s
- Grupo 4: Velocidades mayores a 2.50 m/s

Las Figuras 23 y 24 presentan los resultados de las presiones obtenidas del sistema de riego actual y de diseño respectivamente. Además, representan la cantidad de aspersores divididos en cuatro grupos de acuerdo con la presión obtenida en cada uno de ellos.

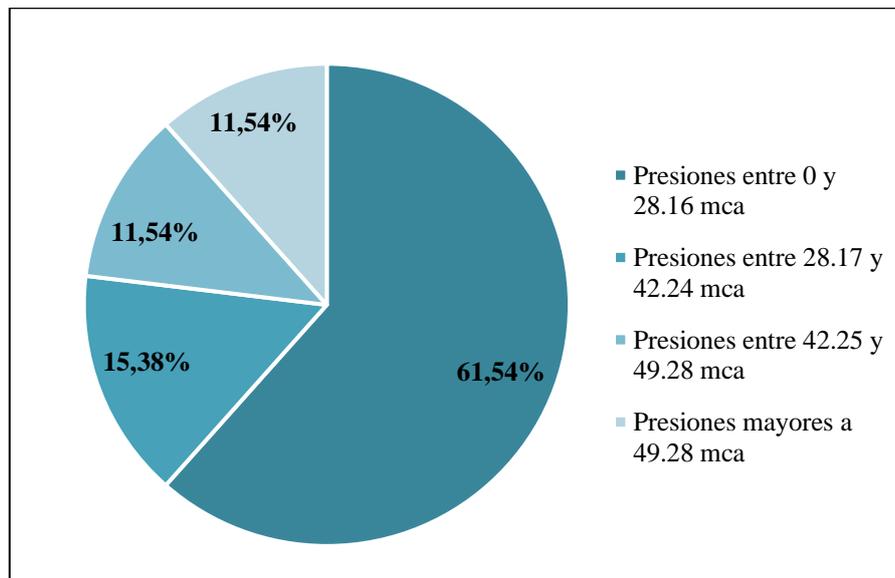


Figura 23. Resultados de presiones "Actual"

Fuente: Elaboración propia

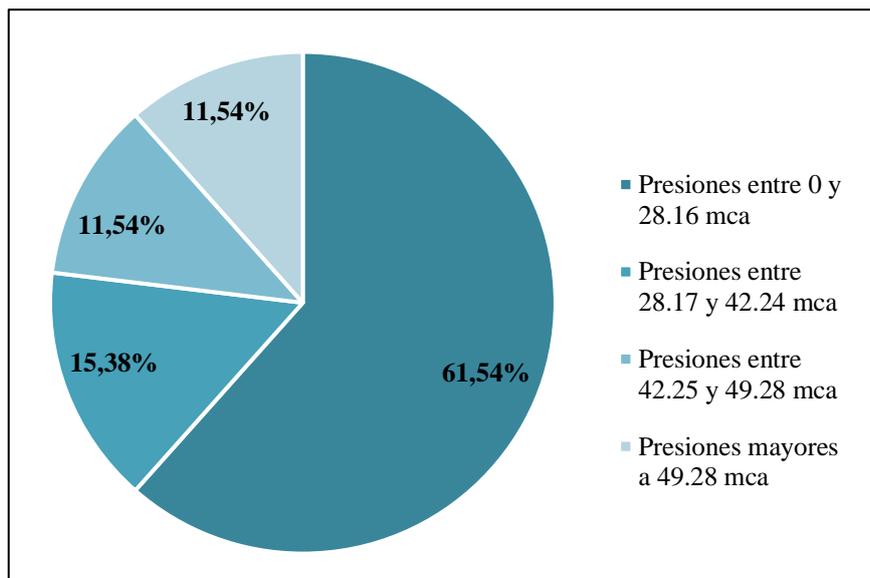


Figura 24. Resultados de presiones "Diseño"

Fuente: Elaboración propia

La Figura 23 muestra que, el 61.54% de los puntos medidos se ubica en el rango de presiones más bajas (Grupo 1), lo que indica que la mayoría de los aspersores está operando con presiones insuficientes para un riego eficiente, afectando la distribución uniforme del agua. El 15.38% de los puntos está en un rango intermedio (Grupo 2), lo que refleja una menor proporción de áreas con presiones intermedias, posiblemente debido a variaciones en el diseño o eficiencia del sistema. El 11.54% se encuentra en el Grupo 3, indicando en algunas áreas se alcanzan presiones más altas, lo cual es favorable para garantizar una distribución eficaz del agua en zonas de mayor demanda o elevación. Finalmente, el Grupo 4 también representa un 11.54%, lo que indica que, aunque hay presencia de presiones elevadas, estas no son excesivas, evitando riesgos de sobrepresión y posibles daños al sistema.

En la Figura 24, los resultados obtenidos reflejan una distribución de presiones similar al sistema actual, manteniendo las mismas proporciones en cada rango de presión. Esto indica una correlación directa en el comportamiento hidráulico del sistema bajo las condiciones actuales y de diseño.

En ambos sistemas, tanto el de diseño como el actual, se observa que la mayor parte de las presiones se encuentra en el Grupo 1, que corresponde a valores menores a 28.16 mca. Esta tendencia muestra una deficiencia generalizada en la presión, lo que podría comprometer la eficiencia del riego y la distribución adecuada del agua en ambas configuraciones.

Por otro lado, las Figuras 25 y 26 presentan los resultados de las velocidades obtenidas del sistema de riego actual y de diseño, respectivamente.

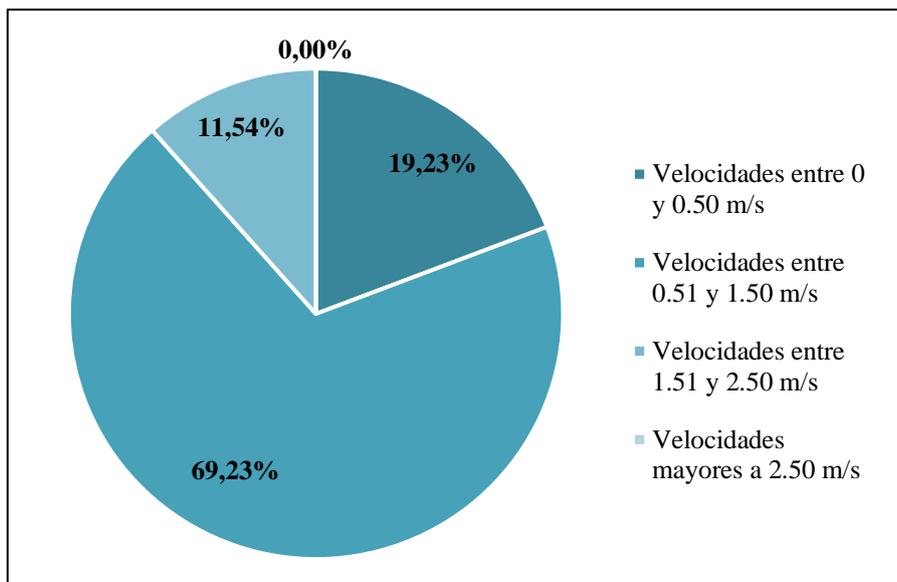


Figura 25. Resultados de velocidades "Actual"

Fuente: Elaboración propia

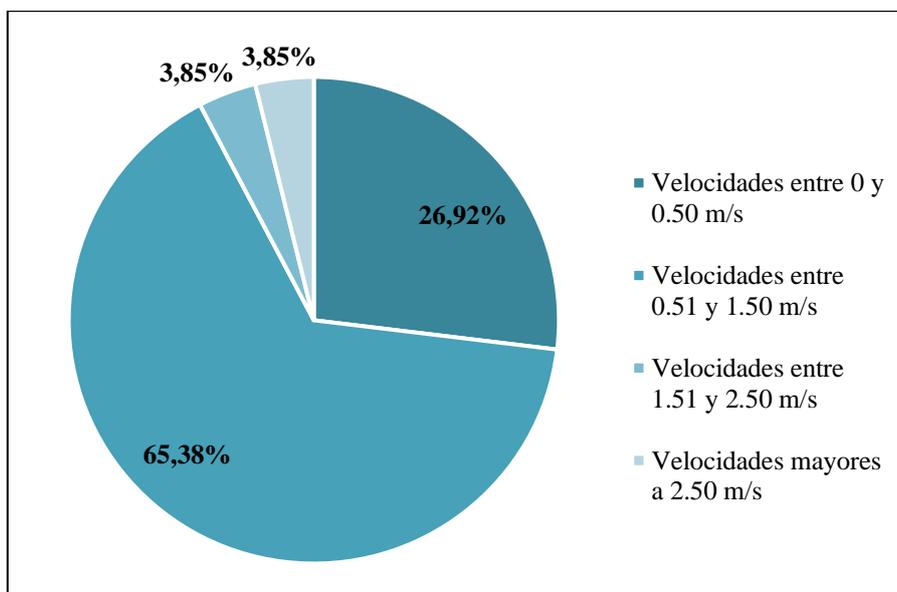


Figura 26. Resultados de velocidades "Diseño"

Fuente: Elaboración propia

Al analizar las gráficas que representan las velocidades en dos sistemas de riego actual y de diseño, se observa una distribución diferente en la cantidad de aspersores entre los cuatro grupos. En el sistema actual, el 69.23% de los puntos de medición se encuentra en el Grupo 2, con velocidades ente 0 y 1.50 m/s, lo que indica que la mayoría de los aspersores operan en un rango de velocidad subóptimo para maximizar la eficiencia del riego. Un 19.23% de los puntos está en el Grupo 1, con velocidades inferiores a 0.50 m/s, lo cual indica un flujo significativamente bajo que podría afectar la uniformidad de la cobertura. El 11.54% de los puntos pertenece al Grupo 3, con velocidades entre 1.51 m/s y 2.50 m/s, mientras que no se registran puntos en el Grupo 4, indicando que el sistema actual no alcanza las velocidades

mayores a 2.5 m/s, necesarias para un rendimiento hidráulico óptimo. Mientras que, en el sistema de riego de diseño, la distribución es diferente: el 65.38% de los puntos también se sitúa en el Grupo 2, lo que confirma una tendencia similar hacia velocidades moderadamente bajas. Sin embargo, un 26.92% de los puntos se ubica en el Grupo 1, indicando una mayor proporción de velocidades muy bajas en comparación con el sistema actual. Solo el 3.85% de los puntos alcanza el Grupo 3 y otro 3.85% el Grupo 4, lo que indica una leve mejora en la capacidad de flujo respecto al sistema actual; no obstante, el rendimiento hidráulico sigue siendo insuficiente para lograr una distribución óptima.

4.4 Rendimiento hidráulico en aspersores

El rendimiento hidráulico en aspersores se refiere a la eficiencia con la que un sistema de riego distribuye el agua sobre una superficie, considerando factores clave como presión y caudal.

A través de la simulación del sistema de riego realizado en EPANET, se tomaron en cuenta los datos hidráulicos resultantes de cada uno de los aspersores estudiados, tanto para el sistema actual como el de diseño, así lo muestra la Tabla 8. Es importante recalcar también que un pequeño número de aspersores muestran rendimientos de presión superiores al 100%, lo que indica que estos aspersores están operando a una presión mayor de la prevista o recomendada en el diseño. Estos aspersores serán destacados en la Tabla 9 para facilitar su identificación y análisis. A diferencia de estos, el resto de los aspersores operan a presiones ligeramente inferiores a las esperadas.

Tabla 9. Rendimiento hidráulico de aspersores - Sistema de Riego Actual vs Diseño

Aspersor	Identificación Nodo	Actual		Diseño	
		Demanda [l/s]	Presión [mca]	Demanda [l/s]	Presión [mca]
1	N 72	0.6	21.14	0.3	21.17
2	N 73	0.52	26.72	0.3	26.89
3	N 79	0.9	37.7	1	37.78
4	N 80	0.77	42.32	0.4	42.67
5	N 82	0.84	47.48	1.1	47.54
6	N 83	0.74	51.19	0.4	51.45
7	N 85	0.7	55.48	0.6	55.56
8	N 86	0.63	56.5	0.6	56.58
9	N 110	0.64	16.38	0.7	16.24
10	N 111	0.53	22.07	1.1	21.18
11	N 112	0.71	29.54	0.6	28.79
12	N 115	0.87	23.66	0.7	23.84
13	N 123	0.56	5.46	0.4	5.48
14	N 124	0.57	14.32	0.4	14.41

15	N 129	0.52	15	0.4	15
16	N 135	0.76	21.1	0.6	21.42
17	N 141	0.77	16.81	0.6	16.88

Fuente: Elaboración propia

Tras el análisis del tipo de aspersor y los resultados hidráulicos obtenidos en la simulación, se elaboró una gráfica comparativa entre las presiones de los aspersores del sistema actual y de diseño, frente a los valores proporcionados por el catálogo del fabricante. El propósito de este análisis es identificar cuántos aspersores operan dentro de los rangos de presión de trabajo especificados en la Tabla 8, lo que permitirá evaluar si el sistema cumple con los parámetros óptimos de operación establecidos.

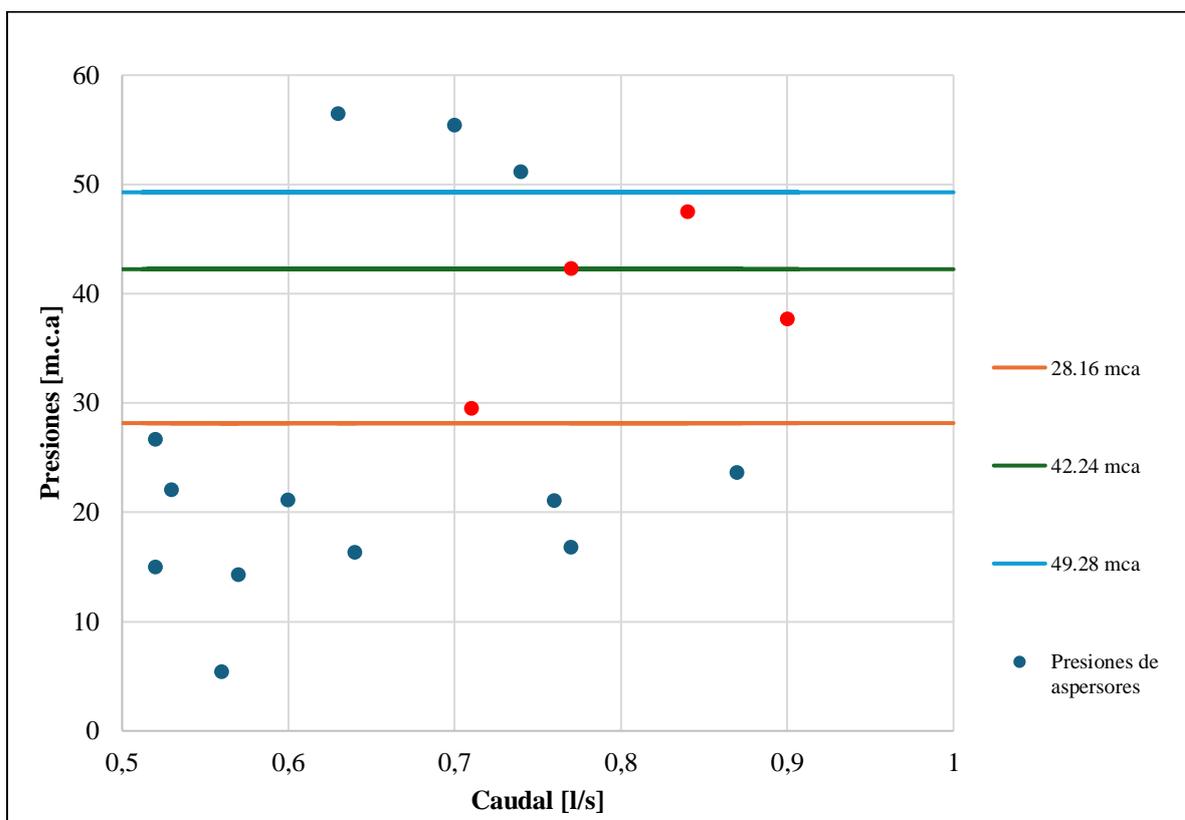


Figura 27. Presiones Modelo Hidráulico Actual

Fuente: Elaboración propia

La Figura 27 muestra la distribución de las presiones en los aspersores del sistema actual. Los resultados indican que únicamente cuatro aspersores (Aspersor 3, 4, 5 y 11), expuestos en la Tabla 9, operan dentro del rango de presiones de trabajo especificado en la ficha técnica del proveedor. Esta discrepancia muestra posibles deficiencias en el rendimiento hidráulico del sistema, que podrían estar asociadas a fugas, pérdidas de carga excesivas u otros factores no contemplados en el diseño original. La identificación de estas desviaciones es esencial, ya que pone de manifiesto la necesidad de realizar ajustes correctivos para optimizar el desempeño del

sistema de riego, asegurando que los aspersores operen en sus parámetros de diseño, mejorando así la eficiencia en la distribución del agua.

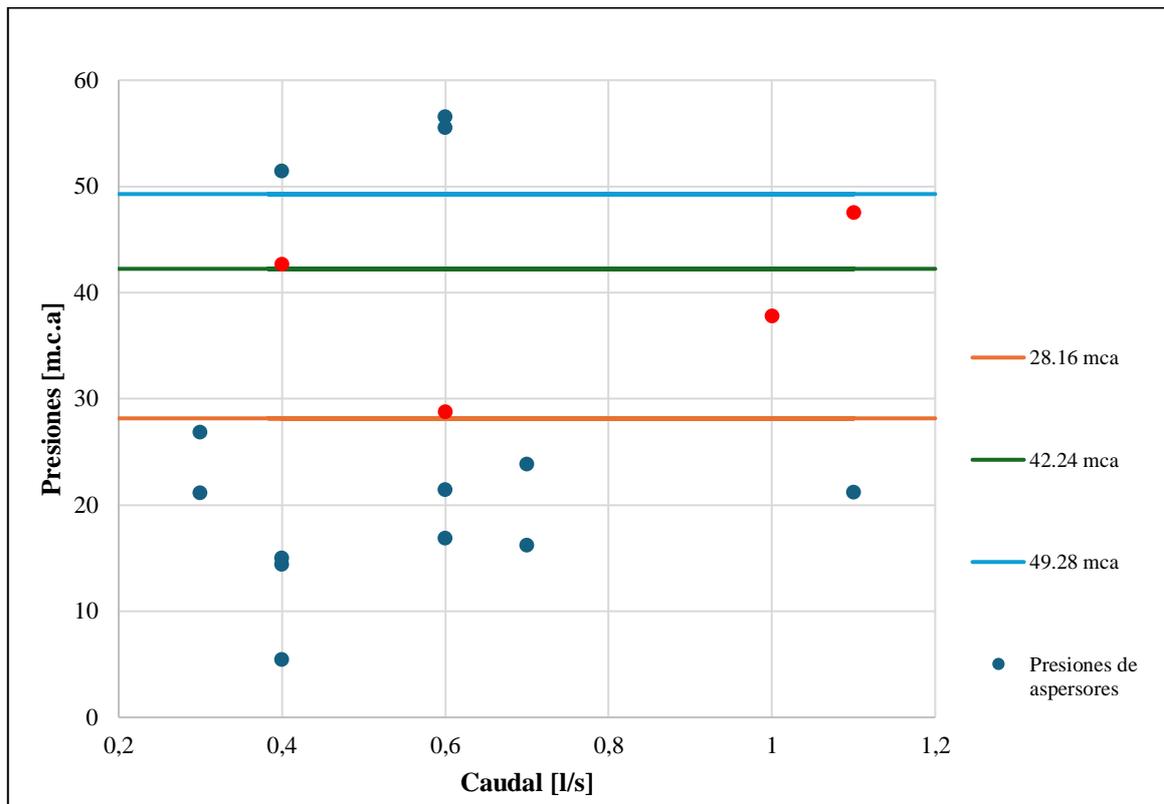


Figura 28. Presiones Modelo Hidráulico Diseño

Fuente: Elaboración propia

Mientras que la Figura 28 presenta la distribución de presiones en los aspersores del sistema de diseño, ofreciendo una visualización precisa del comportamiento hidráulico en los distintos puntos del sistema de riego. Al igual que en el análisis anterior, se observa que solo cuatro aspersores operan dentro del rango de presiones y caudales especificados en la ficha técnica. Cabe señalar que estos corresponden a los mismos aspersores identificados previamente y que se encuentran registrados en la Tabla 9. Esta tendencia recurrente indica la existencia de anomalías que afectan el rendimiento del sistema, posiblemente derivadas de variaciones topográficas, pérdidas de carga por fricción en las tuberías o una distribución deficiente de la energía potencial en el sistema gravitacional.

Finalmente, al comparar y analizar las dos gráficas, se ha evidenciado que una parte significativa de los aspersores en el sistema actual opera fuera del rango de presiones y caudales óptimos. Esta discrepancia ha puesto de manifiesto diversas irregularidades en el desempeño hidráulico. A pesar de que el sistema de diseño ofrece una distribución de presiones más adecuada, su implementación en campo presenta deficiencias que comprometen la eficiencia general y la uniformidad del riego.

4.5 Información de válvulas del sistema de riego

Las gráficas presentadas a continuación muestran la línea piezométrica junto con la distribución de las válvulas en el sistema de riego. La línea piezométrica ofrece una visualización clara de cómo se comporta la presión a lo largo del sistema, permitiendo identificar variaciones clave en la altura de carga hidráulica. Además, las ubicaciones de las válvulas destacan los puntos estratégicos donde se controla y regula el flujo de agua.

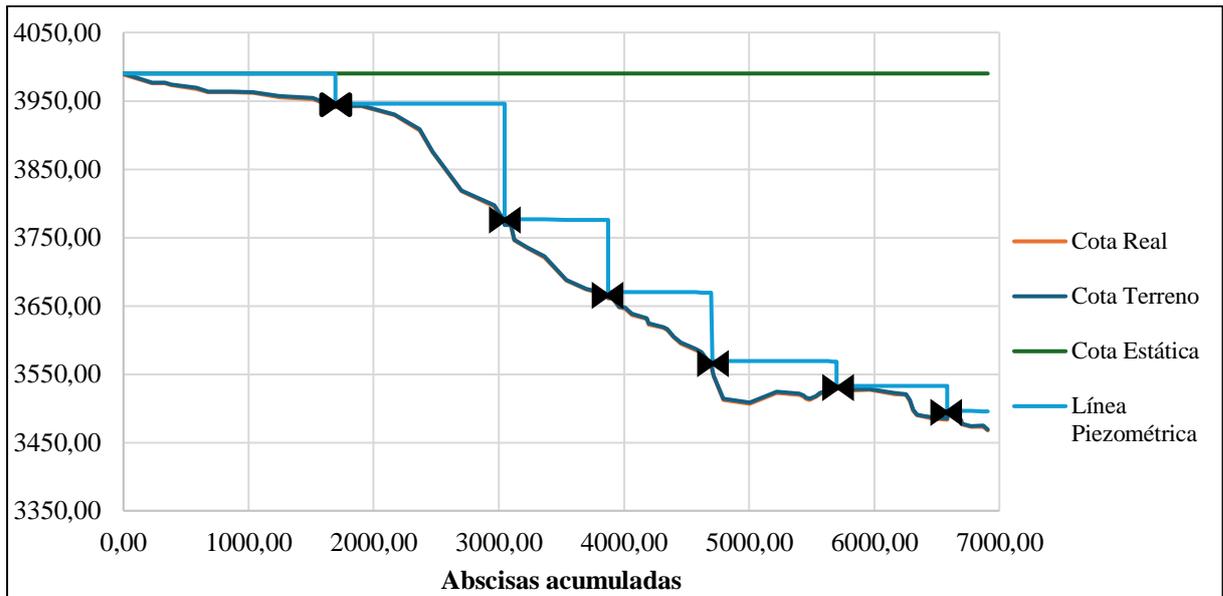


Figura 29. Diagrama Línea Piezométrica "Tramo 1"

Fuente: Elaboración propia

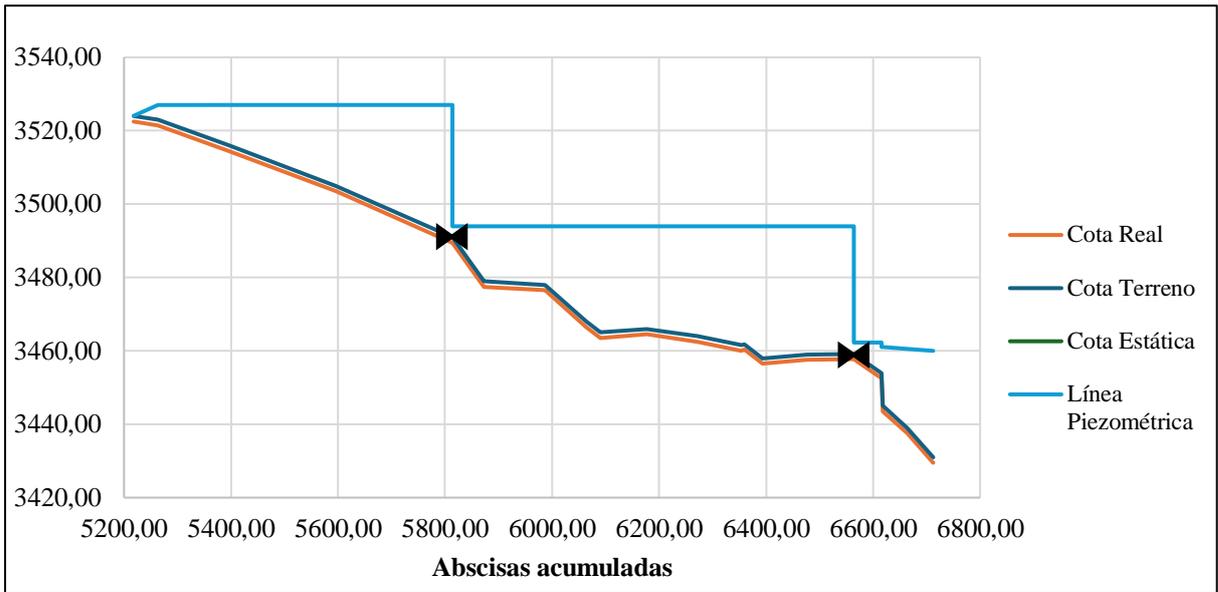


Figura 30. Diagrama Línea Piezométrica "Tramo 2"

Fuente: Elaboración propia

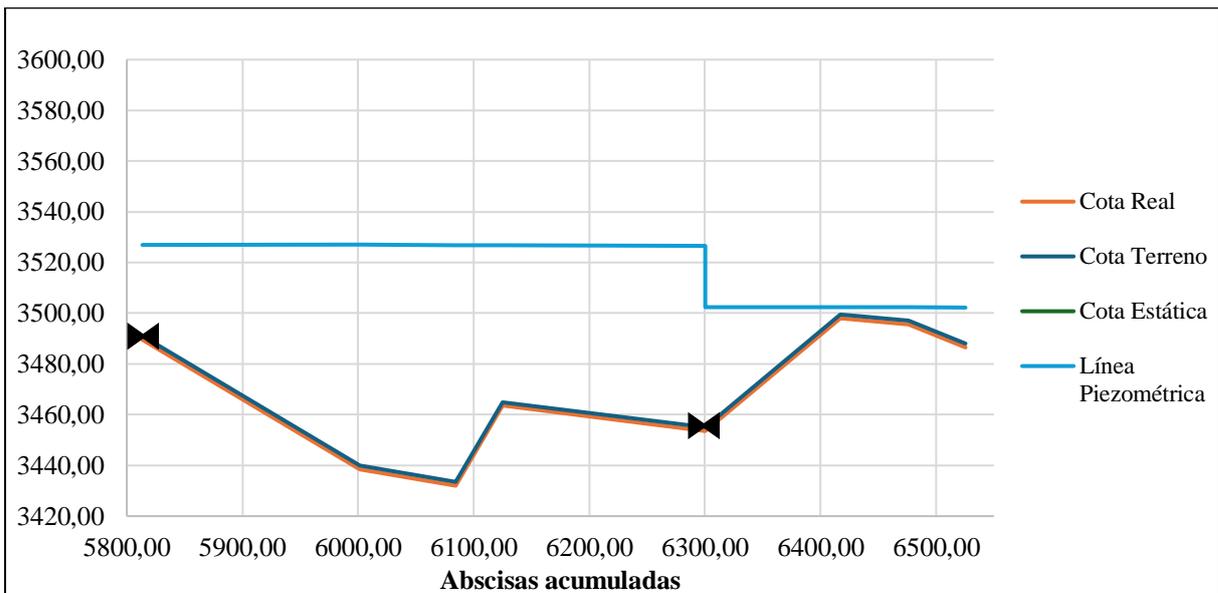


Figura 31. Diagrama Línea Piezométrica "Tramo 3"

Fuente: Elaboración propia

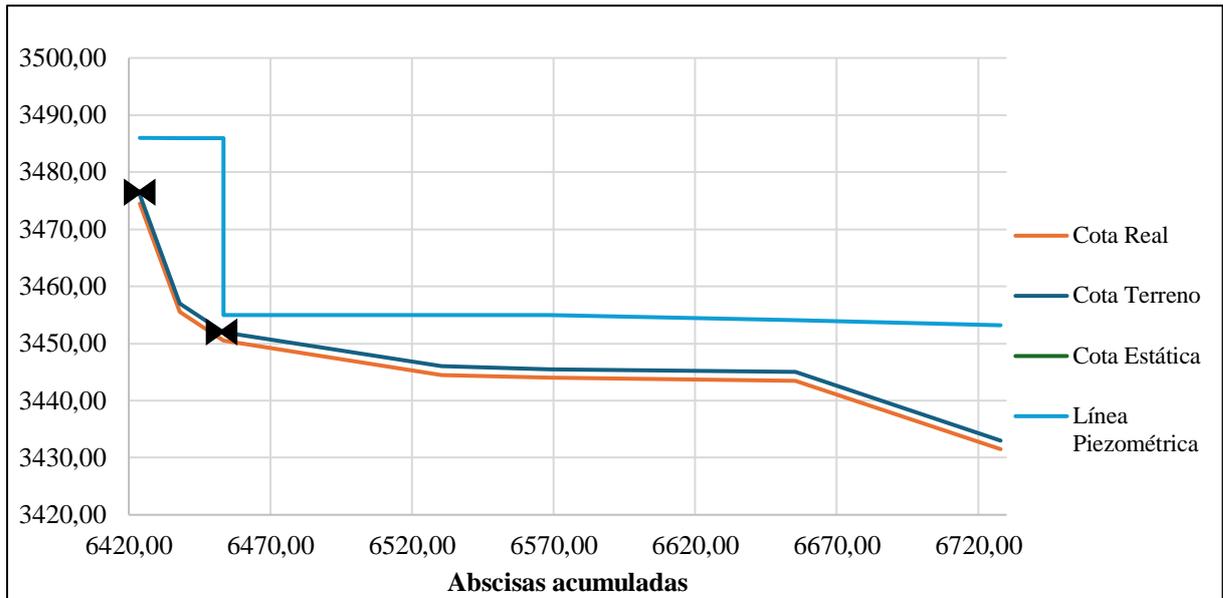


Figura 32. Diagrama Línea Piezométrica "Tramo 4"

Fuente: Elaboración propia

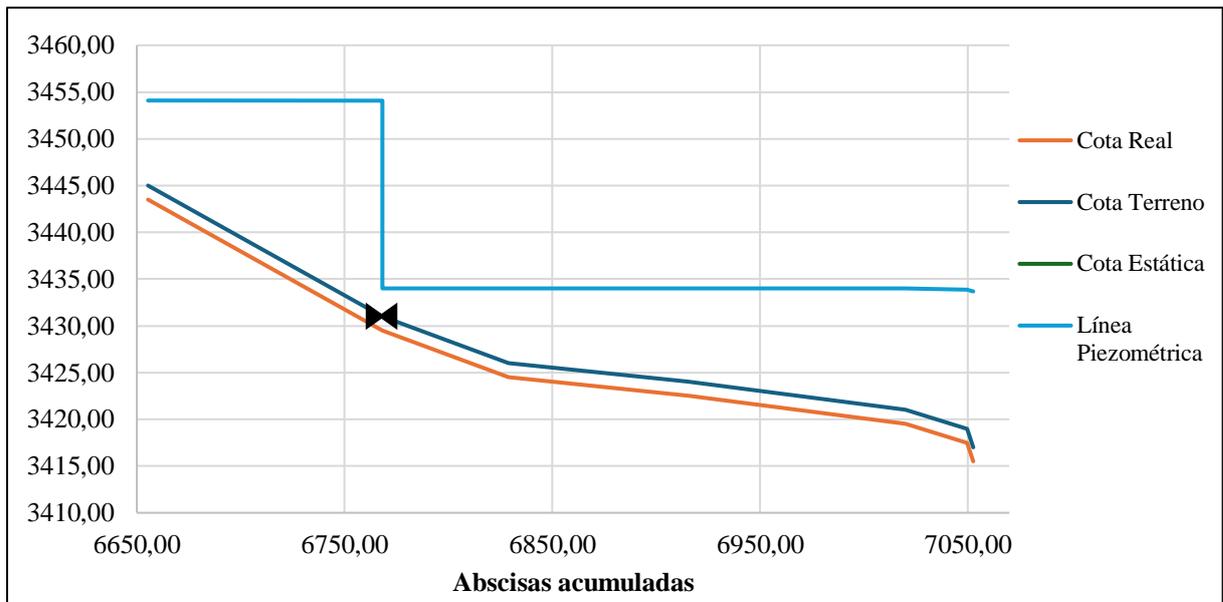


Figura 33. Diagrama Línea Piezométrica "Tramo 5"

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan las tablas que detallan las Válvulas Reductoras de Presión (VRP) junto con el gradiente de elevación asociado a cada uno dentro de sus respectivos ramales. Estos datos permiten una evaluación precisa de las variaciones de altura a lo largo de la red hidráulica, facilitando el análisis del comportamiento del sistema en términos de regulación de presión. La relación entre el gradiente de elevación y la ubicación de las VRP es crítica para asegurar que la distribución de presiones en los distintos tramos cumpla con los requisitos de diseño y garantice un funcionamiento eficiente del sistema.

Tabla 10. Válvulas Reductoras de Presión “Línea 1 - Ramal Central”

VRP	X	Y	Z	Consigna de presión aguas abajo [mca]	Gradiente de elevación [m]
1	749768.612	9829468.718	3943.200	3.00	169.70
2	749109.502	9828488.965	3773.500	3.00	106.50
3	748652.555	9827819.855	3667.000	3.00	101.00
4	748523.760	9827038.953	3566.000	3.00	35.91
5	748088.815	9826308.295	3530.090	3.00	37.09
6	747358.837	9825835.279	3493.000	3.00	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Válvulas Reductoras de Presión “Línea 2 - Ramal Central 1”

VRP	X	Y	Z	Consigna de presión aguas abajo [mca]	Gradiente de elevación [m]
7	748526.098	9826486.635	3524.000	3.00	33.00
8	748381.169	9825894.762	3491.000	3.00	31.80
9	748675.290	9825420.597	3459.200	3.00	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Válvulas Reductoras de Presión “Línea 3 - Ramal Pusó Rumi”

12	X	Y	Z	Consigna de presión aguas abajo [mca]	Gradiente de elevación [m]
10	748653.362	9825508.174	3499.500	3.00	16.50
11	748680.692	9825665.499	3483.000	3.00	31.00
12	748886.012	9825529.066	3452.000	3.00	21.00
13	749107.917	9825387.802	3431.000	3.00	

Fuente: Elaboración propia

4.6 Análisis comparativo de caudales actual vs diseño del sistema de riego

En este análisis comparativo se examina el rendimiento de los caudales entre el sistema de riego actual y el sistema de diseño. El objetivo es identificar las diferencias entre ambos sistemas, evaluando cómo las condiciones actuales de operación se ajustan o desvían de los parámetros previstos en el diseño.

Tabla 13. Resumen de caudales "Actual vs Diseño"

Aspersor	Q actual [l/s]	Q diseño [l/s]	Observación
1	0.60	0.30	OK
2	0.52	0.30	OK
3	0.90	1.00	Déficit
4	0.77	0.40	OK
5	0.84	1.10	Déficit
6	0.74	0.40	OK
7	0.70	0.60	OK
8	0.63	0.60	OK
9	0.64	0.70	Déficit
10	0.53	1.10	Déficit
11	0.71	0.60	OK
12	0.87	0.70	OK
13	0.56	0.40	OK
14	0.57	0.40	OK
15	0.52	0.40	OK
16	0.76	0.60	OK
17	0.77	0.60	OK

Fuente: Elaboración propia

El análisis de los caudales, según lo presentado en la Tabla 13, indica que la mayoría de los aspersores operan dentro de los rangos de caudal aceptables, categorizados como 'OK'. No obstante, se identificaron cuatro casos de "Déficit", en los que los caudales no alcanzan los valores mínimos requeridos para garantizar un rendimiento hidráulico óptimo. Este déficit puede atribuirse principalmente a varios factores técnicos. En primer lugar, la presión insuficiente en ciertos puntos del sistema puede estar limitando el caudal disponible, ya que una presión baja reduce la eficiencia del aspersor. Además, las diferencias de elevación entre los puntos de suministro y los aspersores pueden causar desequilibrios de presión, lo que afecta directamente el flujo en algunas zonas.

Otro factor que podría explicar estos déficits es una distribución ineficiente del caudal en ramales con longitudes excesivas o conexiones inadecuadas, lo que provoca una disminución en la cantidad de agua disponible para los aspersores en ciertos tramos. Asimismo, un diseño subóptimo de la red o la falta de mantenimiento adecuado, como la obstrucción parcial de las

tuberías o el desgaste de los componentes, también podrían estar contribuyendo a esta deficiencia. Estos factores indican la necesidad de ajustes tanto en el diseño como en la operación del sistema para corregir las irregularidades de caudal y mejorar la eficiencia global del riego.

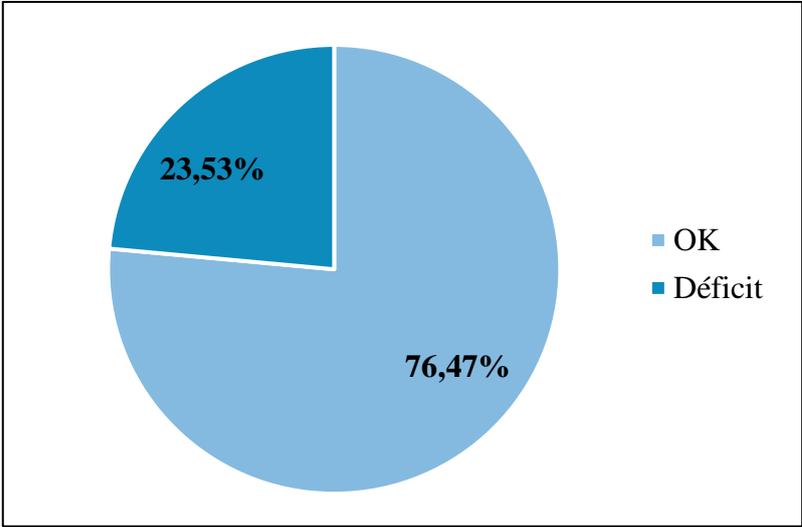


Figura 34. Rendimiento general de aspersores

Fuente: Elaboración propia

La Figura 34 muestra el porcentaje de eficiencia que tienen cada uno de los aspersores estudiados, teniendo así que un 76.47% supera el rendimiento del sistema de diseño mientras que el 23.53% se encuentra por debajo del mismo.

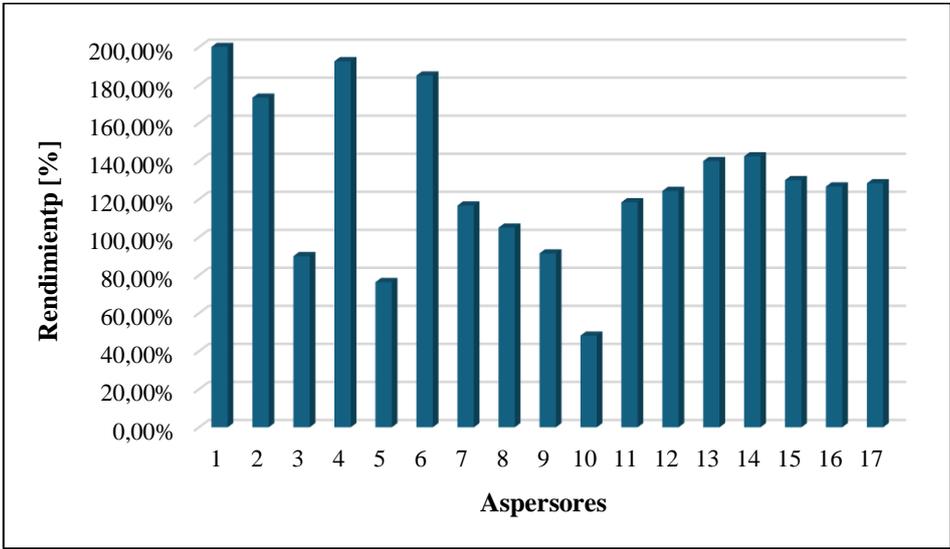


Figura 35. Rendimiento en aspersores "Sistema actual vs Sistema diseño"

Fuente: Elaboración propia

En resumen, la Figura 35 presenta una comparación de los rendimientos de los aspersores entre el sistema actual y el sistema de diseño. En este contexto, el rendimiento se refiere a variables clave como caudales, velocidades y presiones en los aspersores. Se observa que la

mayoría de los aspersores en ambos sistemas superan el rendimiento teórico esperado, indicando un desempeño adecuado en términos de eficiencia de riego. Sin embargo, también se identifica un número significativo de aspersores que no alcanzan este rendimiento teórico, lo que sugiere áreas de mejora y la necesidad de ajustes para optimizar el funcionamiento general del sistema de riego.

4.7 Análisis de Correlación de “Diámetro de Alcance vs Presión”

El presente análisis examina la correlación entre el Diámetro de Alcance y la Presión del sistema de riego. A través de las gráficas de dispersión, se incluyen líneas de tendencia ajustadas para modelar la relación funcional entre ambas variables. Estas líneas están acompañadas de sus respectivas ecuaciones. Además, se muestra el coeficiente de Pearson, el cual indica el grado de correlación entre ambas variables.

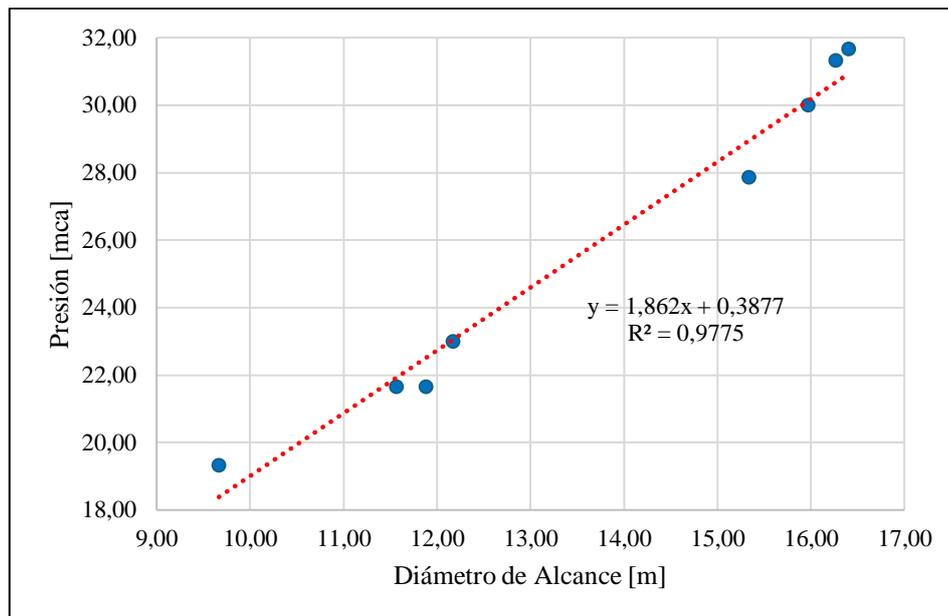


Figura 36. Correlación Línea 3 - Ramal Pusó Rumi

Fuente: Elaboración propia

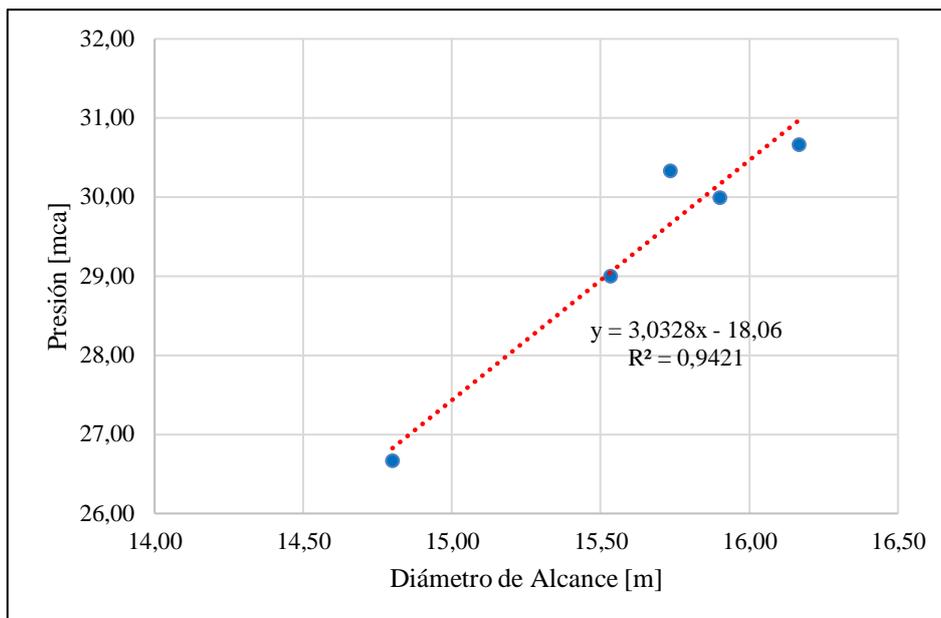


Figura 37. Correlación Línea 2 - Ramal Central 1

Fuente: Elaboración propia

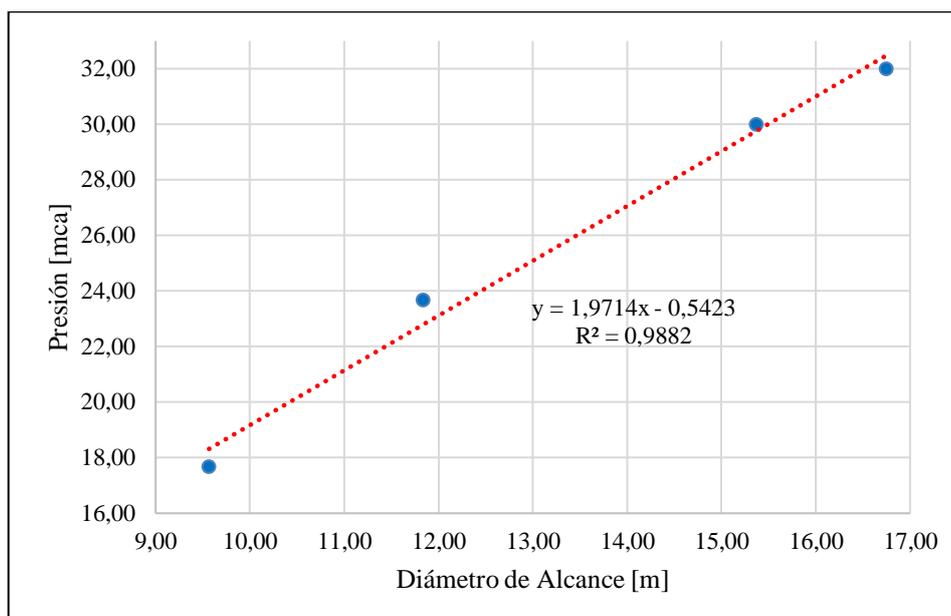


Figura 38. Correlación Línea 1 - Ramal Central

Fuente: Elaboración propia

Los coeficientes de Pearson son superiores a 0.9, indicando una correlación fuerte y positiva entre el diámetro de alcance y presión. Es decir que, a medida que aumenta la presión, el diámetro de alcance también tiende a incrementarse de manera proporcional, esto confirma la consistencia de la relación lineal observada en estos casos.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 Conclusiones

El proyecto de investigación permitió evaluar la eficiencia en el uso del agua dentro de un sistema de riego por aspersión, ayudando a comprender de forma correcta el funcionamiento del sistema y el impacto que tiene en los beneficiarios. El análisis realizado revela diferencias significativas entre el desempeño operativo actual del sistema de riego y las especificaciones hidráulicas de su diseño. Estas discrepancias, observadas principalmente en los valores de presión y velocidad en diversos puntos de la red, afectan la uniformidad y eficiencia de la distribución de agua, limitando el rendimiento del sistema. Las variaciones detectadas indican la presencia de pérdidas de carga adicionales, condiciones topográficas no consideradas en el diseño, y posibles ajustes operativos que no corresponden con los parámetros proyectados.

A través de los trabajos realizados en campo, como la toma de presiones y el método de aforo, se logró recopilar información específica sobre el sistema de riego por aspersión ubicado en la comunidad de Sanjapamba de la Parroquia San Andres del Cantón Guano, permitiendo obtener una visión completa de su diseño y funcionamiento. Este análisis incluyó la identificación de los componentes clave, como ramales y aspersores, y la evaluación de variables hidráulicas importantes como la presión, velocidad y caudal. Además, la información obtenida fue esencial para comprender las características del sistema, detectar áreas con deficiencias de rendimiento y proponer mejoras en su eficiencia operativa.

La evaluación del comportamiento hidráulico del sistema de riego ha permitido identificar diferencias significativas entre el rendimiento del sistema de riego actual y el de diseño. A pesar de que el 76.47% de los aspersores cumplen con los parámetros de rendimiento estipulados, el 23.53% restante presenta deficiencias que se originan principalmente en las bajas presiones y velocidades en ciertos tramos del sistema. Estas irregularidades limitan la efectividad del riego y pueden comprometer el rendimiento agronómico en las áreas afectadas.

La simulación del sistema de riego realizado en EPANET proporciona una evaluación exhaustiva de su funcionamiento. Los resultados obtenidos indican que los rendimientos de velocidad y presión en varios puntos del sistema se alinean con los parámetros establecidos en el diseño original; sin embargo, también se han identificado áreas donde estos rendimientos no cumplen con las expectativas de diseño. Esta discrepancia señala la existencia de

irregularidades en la operación del sistema que pueden estar influyendo negativamente en su eficiencia hidráulica.

El análisis estadístico ha revelado un coeficiente de Pearson cercano a 1 entre diámetro de alcance y presión, teniendo como resultado una correlación positiva entre las variables. Esta relación indica que el comportamiento del sistema de riego se alinea con las expectativas teóricas, validando así la precisión del modelo utilizado.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar una revisión exhaustiva de los tramos que presentan bajas presiones y velocidades, con el objetivo de ajustar las válvulas reguladoras. Esta acción permitirá mejorar la presión en las áreas deficientes, garantizando así que todos los aspersores reciban un caudal adecuado para un funcionamiento óptimo.

Se recomienda implementar un sistema de monitoreo continuo para registrar las variaciones en presión y caudal. Esta medida facilitará la identificación temprana de problemas, permitiendo realizar ajustes proactivos antes de que impacten significativamente el rendimiento del sistema.

Se recomienda optimizar la distribución de los aspersores, dado que algunos presentan déficits en el rendimiento, mientras que otros superan la eficiencia esperada debido a un desequilibrio en el suministro de agua. Un ajuste adecuado en la distribución garantizaría un riego más uniforme y eficiente en todo el sistema.

Se sugiere aprovechar el modelo hidráulico desarrollado del sistema de riego como base para futuros estudios y optimizaciones. Este modelo permitirá realizar simulaciones más precisas, identificar oportunidades de mejora en la eficiencia hídrica y facilitar la toma de decisiones basadas en datos reales.

BIBLIOGRAFÍA

- AGROPINOS. (Marzo de 2022). *SISTEMA DE RIEGO POR ASPERSIÓN*. Obtenido de <https://www.agropinos.com/blog/sistema-de-riego-por-aspersion>
- Antunez, A. (2016). *EFICIENCIA DE RIEGO EN SISTEMAS LOCALIZADOS*. Obtenido de <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/7272/NR36474.pdf?sequence=9&isAllowed=y>
- AQUAE FUNDACIÓN. (2023). *Tipos de sistema de riego y sus características*. Obtenido de <https://www.fundacionaquae.org/wiki/tipos-de-riego/>
- Contreras, G. (Febrero de 2017). *Modelado matemático, simulación, análisis y control de un sistema hidráulico*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6546153.pdf>
- FAO. (2013). *THE STATE OF THE WORLD'S LAND AND WATER RESOURCES FOR FOOD AND AGRICULTURE*. Obtenido de <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/43a8de74-ca40-4808-b0bf-fc1371935803/content>
- Gur, E., & Spuhler, D. (2018). *Water distribution pipes*. Obtenido de <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/red-de-distribuci%C3%B3n-comunitaria#:~:text=Una%20red%20de%20distribuci%C3%B3n%20es,agua%20comunitaria%20o%20conexiones%20domiciliarias>.
- Lapo, C. (2012). *DISEÑO ÓPTIMO DE SISTEMAS DE RIEGO A PRESIÓN Y SU EFICIENCIA HIDRO-ENERGÉTICA*. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/18322/TFM%20Mireya%20Lapo%20-%20Sept%202012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Losada, A. (2016). *Sistemas de Riego*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/3084/44article6.pdf>
- Morales, R. (2019). *Impacto de automatización de riego: Caso de estudio*. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-55462020000200917&script=sci_arttext
- Naroua, Rodríguez Sinobas, Sánchez Calvo, & Rodríguez Ros. (2012). *Evaluación de los sistemas de riego por aspersión en la Comunidad de Regantes "Río Adaja" y*

- propuestas para la mejora del manejo del riego*. Obtenido de https://oa.upm.es/19378/1/INVE_MEM_2012_140545.pdf
- Ortiz, Y. (2017). *MODELACIÓN MATEMÁTICA E HIDRÁULICA DEL FLUJO EN PILARES EN UN CANAL CON SEDIMENTACIÓN*. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/5287/OrtizAguileraYulyIbo n2017.pdf;jsessionid=24D339794C9856DFC999963A94BFE5C1?sequence=1>
- Pereira, L., Paredes, P., Rodrigues, G., & Neves, M. (2020). *Modeling and Design of Water Distribution Systems for Precision Irrigation Using Hydrus and GIS Tools*. *Agricultural Water Management*, 241, 106363. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.006>
- Perez, R. (Septiembre de 2021). *El agua en la agricultura: importancia y manejo*. Obtenido de <https://www.iagua.es/blogs/ricardo-perez/agua-agricultura-importancia-y-manejo>
- Rodríguez, M. (2011). *Comportamiento hidráulico de los sistemas de riego por goteo superficial y sub superficial*. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542011000400007
- Salazar, C., & Apugllón, A. (2019). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS PARA OPTIMIZAR UN SISTEMA DE RIEGO POR ASPERCIÓN EN LA QUINTA “LA DELICIA”*. Obtenido de <http://dspace.esepoch.edu.ec/bitstream/123456789/13626/1/85T00564.pdf>
- SEREA. (2017). *Aproximación PNL-AG para diseño de redes de riego a presión*. Obtenido de https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3108260
- Urrego, Y. (2013). *Análisis de la eficiencia de aplicación y de los cambios microclimáticos y fisiológicos en el riego por aspersión*. Obtenido de https://digital.csic.es/bitstream/10261/73521/1/UrregoY_TD-EEAD_2013.pdf
- Valencia, R. (2015). *El sistema de riego y la incidencia en la productividad agrícola de las comunidades de Cochatuco y Llullucha, parroquia Angamarca, cantón Pujilí, provincia de Cotopaxi*. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/11759/1/Tesis%20890%20-%20Valencia%20Medina%20Roberto%20Vinicio.pdf>
- Vásconez, J. (Mayo de 2013). *Diseño e implementación de un sistema de riego automatizado y controlado de forma inalámbrica*. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5304/1/UPS-GT000434.pdf>

ANEXOS

Tabla 14. Válvulas contempladas en el simulador EPANET

VÁLVULA	ABREVIATURA	CONCEPTO	FUNCIÓN	CONSIGNA "EPANET"	ILUSTRACIÓN
Reductora de presión	PRV	Es un dispositivo utilizado en sistemas hidráulicos para reducir y mantener la presión de salida en un nivel constante, independientemente de las variaciones en la presión de entrada.	Tratan de limitar la presión en el nudo aguas abajo de la válvula, para que no exceda de un valor de consigna prefijado.	Presión (m o psi)	
Sostenedora de presión	PSV	Es un dispositivo utilizado para mantener una presión mínima constante en la línea de suministro o en una parte específica del sistema. Está diseñada para abrirse y cerrarse automáticamente, ajustando el flujo del fluido para garantizar que la presión aguas arriba de la válvula no caiga por debajo de un valor preestablecido.	Asegurar que la presión en el sistema aguas arriba de la válvula se mantenga por encima de un nivel mínimo específico.	Presión (m o psi)	
Rotura de Carga	PBV	Conocidas también como válvulas de interrupción de carga o válvulas de alivio de carga, son dispositivos que se utilizan en sistemas hidráulicos y de transporte de fluidos para proteger el sistema de daños causados por sobrepresiones.	Su función principal es liberar el exceso de presión acumulada en el sistema, asegurando así su integridad y funcionamiento seguro. Están diseñadas para responder rápidamente a aumentos repentinos de presión, proporcionando un alivio inmediato y efectivo. Pueden controlar el flujo de fluido en el sistema, asegurando que se mantenga dentro de los límites seguros.	Caída de Presión (m o psi)	

Limitadoras de Caudal	FCV	Limitan el caudal de paso a través de la válvula a un valor prefijado	Controla la cantidad de fluido que pasa a través de ella, asegurando que el caudal no supere un límite específico	Caudal (unidades de caudal)	
Regulación	TCV	Son bidireccionales y simulan una válvula parcialmente cerrada, cuyo comportamiento queda determinado por el valor del coeficiente de pérdidas menores en la válvula	Puede ajustar la cantidad de fluido que pasa a través del sistema, permitiendo aumentar o disminuir el caudal según las necesidades específicas del proceso.	Coef. Pérdidas (sin unidades)	
Propósito General	GPV	Dispositivo mecánico utilizado en sistemas de conducción de fluidos (líquidos o gases) para controlar, dirigir o regular el flujo del fluido	Se utilizan para representar una línea cuya relación pérdida-caudal es proporcionada por el usuario. Permite iniciar, detener o ajustar el flujo de fluido en un sistema, proporcionando un control básico sobre la cantidad de fluido que pasa a través de la válvula.	Identificativo ID de la curva de pérdidas	

Fuente: (Manual EPANET 2.0 en español, 2002)

Tabla 15. Hoja de cálculos hidráulicos del sistema de riego

Punto	X	Y	Z	Abscisas	Abscisas Acumuladas	Profundidad (m)	Cota tubería	Long. Real (m)	Diámetro Ext. (mm)	Diámetro Int. (mm)	Demanda (l/s)	Gradiente hidráulico (J)	Pérdidas fricción (hf)	Velocidad (m/s)	Cota Piezométrica	Carga Piezométrica (mca)	Control
1	751521.662	9829987.758	3990.00	0	0	1.5	3988.50				11.63	0.00318721233228755	0.058615774		3990.00	0.00	Cumple
				229.05	229.05			18.38	160	144.80				0.71			
2	751328.376	9829864.860	3977.00			1.5	3975.50				11.63	0.00318721233228755	0.000901781		3990.00	13.00	Cumple
				101.59	330.64			0.28	160	144.80				0.71			
3	751248.196	9829802.977	3976.80			1.5	3975.30				11.63	0.00318721233228755	0.012624936		3989.99	13.19	Cumple
				52.54	383.18			3.96	160	144.80				0.71			
4	751204.618	9829773.409	3974.00			1.5	3972.50				11.63	0.01971928227857220	0.139515861		3989.85	15.85	Cumple
				201.81	584.99			7.07	110	99.60				1.49			
5	751030.104	9829672.038	3969.00			1.5	3967.50				11.63	0.01971928227857220	0.139515861		3989.71	20.71	Cumple
				93.19	678.18			7.07	110	99.60				1.49			
6	750936.994	9829668.271	3964.00			1.5	3962.50				11.63	0.01971928227857220	0.002790317		3989.70	25.70	Cumple
				182.17	860.35			0.14	110	99.60				1.49			
7	750764.008	9829725.376	3963.90			1.5	3962.40				11.63	0.01971928227857220	0.025112855		3989.68	25.78	Cumple
				178.02	1038.37			1.27	110	99.60				1.49			
8	750586.968	9829708.336	3963.00			1.5	3961.50				11.63	0.01971928227857220	0.167419033		3989.51	26.51	Cumple
				209.86	1248.23			8.49	110	99.60				1.49			
9	750377.272	9829699.952	3957.00			1.5	3955.50				11.63	0.01971928227857220	0.083709516		3989.43	32.43	Cumple
				267.57	1515.80			4.24	110	99.60				1.49			
10	750116.314	9829640.857	3954.00			1.5	3952.50				11.63	0.00318721233228755	0.048696181		3989.38	35.38	Cumple
				179.60	1695.40			15.27	160	144.80				0.71			
11	749950.216	9829572.626	3943.20			1.5	3941.70				11.63	0.00318721233228755	0.00766514		3989.37	46.17	Cumple
				209.34	1904.74			2.40	160	144.80				0.71			
12	749768.612	9829468.718	3943.20			1.5	3941.70				11.63	0.00318721233228755	0.05929211		3946.20	3.00	Cumple
				260.60	2165.34			18.60	160	144.80				0.71			
13	749579.547	9829289.156	3930.05			1.5	3928.55				11.63	0.00318721233228755	0.09942137		3946.10	16.05	Cumple
				201.98	2367.32			31.18	160	144.80				0.71			
14	749496.103	9829105.292	3908.00			1.5	3906.50				11.63	0.00318721233228755	0.144284982		3945.96	37.96	Cumple
				101.34	2468.66			45.25	160	144.80				0.71			
15	749440.395	9829020.640	3876.00			1.5	3874.50				11.63	0.00318721233228755	0.257007624		3945.70	69.70	Cumple

				234.59	2703.25			80.61	160	144.80				0.71			
16	749313.079	9828823.499	3819.00			1.5	3817.50				11.63	0.00318721233228755	0.099195925		3945.60	126.60	Cumple
				260.81	2964.06			31.11	160	144.80				0.71			
17	749172.467	9828603.839	3797.00			1.5	3795.50				11.63	0.00318721233228755	0.105959284		3945.49	148.49	Cumple
				83.92	3047.98			33.23	160	144.80				0.71			
18	749137.987	9828527.521	3773.50			1.5	3772.00				11.63	0.00318721233228755	0.024798981		3945.47	171.97	Cumple
				47.90	3095.88			7.78	160	144.80				0.71			
19	749109.502	9828488.965	3773.50			1.5	3772.00				11.63	0.00318721233228755	0.119486001		3776.50	3.00	Cumple
				28.66	3124.54			37.48	160	144.80				0.71			
20	749083.523	9828475.517	3747.00			1.5	3745.50				11.63	0.00318721233228755	0.049597963		3776.45	29.45	Cumple
				100.43	3224.97			15.56	160	144.80				0.71			
21	749027.162	9828393.018	3736.00			1.5	3734.50				11.63	0.00318721233228755	0.06312468		3776.39	40.39	Cumple
				138.20	3363.17			19.80	160	144.80				0.71			
22	748949.169	9828279.144	3722.00			1.5	3720.50				11.63	0.00318721233228755	0.153302793		3776.23	54.23	Cumple
				175.26	3538.43			48.08	160	144.80				0.71			
23	748853.411	9828132.565	3688.00			1.5	3686.50				11.63	0.00318721233228755	0.058255061		3776.18	88.18	Cumple
				160.08	3698.51			18.27	160	144.80				0.71			
24	748763.921	9827999.838	3675.08			1.5	3673.58				11.63	0.00318721233228755	0.036431958		3776.14	101.06	Cumple
				175.47	3873.98			11.43	160	144.80				0.71			
25	748664.236	9827855.430	3667.00			1.5	3665.50				11.63	0.00318721233228755	0.022544528		3776.12	109.12	Cumple
				37.44	3911.42			7.07	160	144.80				0.71			
26	748652.555	9827819.855	3667.00			1.5	3665.50				11.63	0.00318721233228755	0.081160302		3670.00	3.00	Cumple
				49.04	3960.46			25.46	160	144.80				0.71			
27	748648.253	9827771.007	3649.00			1.5	3647.50				11.63	0.00318721233228755	0.006763359		3669.99	20.99	Cumple
				48.11	4008.57			2.12	160	144.80				0.71			
28	748633.585	9827725.185	3647.50			1.5	3646.00				11.63	0.00318721233228755	0.042834604		3669.95	22.45	Cumple
				58.02	4066.59			13.44	160	144.80				0.71			
29	748626.697	9827667.580	3638.00			1.5	3636.50				11.63	0.00318721233228755	0.027053434		3669.92	31.92	Cumple
				113.8	4180.39			8.49	160	144.80				0.71			
30	748614.207	9827554.471	3632.00			1.5	3630.50				11.63	0.00318721233228755	0.036071246		3669.89	37.89	Cumple
				18.59	4198.98			11.31	160	144.80				0.71			
31	748611.078	9827536.162	3624.00			1.5	3622.50				11.63	0.00318721233228755	0.022544528		3669.86	45.86	Cumple
				115.23	4314.21			7.07	160	144.80				0.71			
32	748575.138	9827426.662	3619.00			1.5	3617.50				11.63	0.00318721233228755	0.013526717		3669.85	50.85	Cumple

				33.13	4347.34			4.24	160	144.80				0.71			
33	748563.894	9827395.483	3616.00			1.5	3614.50				11.63	0.00318721233228755	0.050499744		3669.80	53.80	Cumple
				48.67	4396.01			15.84	160	144.80				0.71			
34	748551.459	9827348.424	3604.80			1.5	3603.30				11.63	0.00318721233228755	0.03967837		3669.76	64.96	Cumple
				56.69	4452.70			12.45	160	144.80				0.71			
35	748545.320	9827292.067	3596.00			1.5	3594.50				11.63	0.00318721233228755	0.040580151		3669.72	73.72	Cumple
				122.10	4574.80			12.73	160	144.80				0.71			
36	748531.494	9827170.753	3587.00			1.5	3585.50				11.63	0.00318721233228755	0.020290076		3669.70	82.70	Cumple
				45.19	4619.99			6.36	160	144.80				0.71			
37	748520.529	9827126.917	3582.50			1.5	3581.00				11.63	0.00318721233228755	0.051852415		3669.65	87.15	Cumple
				47.04	4667.03			16.26	160	144.80				0.71			
38	748518.731	9827079.911	3571.00			1.5	3569.50				11.63	0.00318721233228755	0.022544528		3669.63	98.63	Cumple
				29.01	4696.04			7.07	160	144.80				0.71			
39	748520.220	9827050.925	3566.00			1.5	3564.50				11.63	0.00318721233228755	0.045089057		3669.58	103.58	Cumple
				12.50	4708.54			14.14	160	144.80				0.71			
40	748523.760	9827038.953	3566.00			1.5	3564.50				11.63	0.00318721233228755	0.081160302		3569.00	3.00	Cumple
				8.04	4716.58			25.46	160	144.80				0.71			
41	748529.173	9827033.008	3548.00			1.5	3546.50				11.63	0.00318721233228755	0.153302793		3568.85	20.85	Cumple
				78.88	4795.46			48.08	160	144.80				0.71			
42	748530.933	9826954.136	3514.00			1.5	3512.50				11.63	0.00318721233228755	0.027053434		3568.82	54.82	Cumple
				210.68	5006.14			8.49	160	144.80				0.71			
43	748537.645	9826743.559	3508.00			1.5	3506.50				11.63	0.00318721233228755	0.072142491		3568.75	60.75	Cumple
				211.98	5218.12			22.63	160	144.80				0.71			
44	748528.940	9826531.753	3524.00			1.5	3522.50				11.63	0.00318721233228754	0.003514638		3568.74	44.74	Cumple
				180.52	5398.64			4.13	160	144.80				0.35			
45	748350.331	9826505.842	3521.08			1.5	3519.58				5.7	0.00085090971163856	0.003105399		3568.74	47.66	Cumple
				38.52	5437.16			3.65	160	144.80				0.35			
46	748313.074	9826495.899	3518.50			1.5	3517.00				5.7	0.00085090971163856	0.003009108		3568.74	50.24	Cumple
				13.70	5450.86			3.54	160	144.80				0.35			
47	748301.661	9826488.351	3516.00			1.5	3514.50				5.7	0.00085090971163856	0.002407286		3568.74	52.74	Cumple
				31.28	5482.14			2.83	160	144.80				0.35			
48	748271.154	9826495.305	3514.00			1.5	3512.50				5.7	0.00085090971163856	0.004814573		3568.73	54.73	Cumple
				50.74	5532.88			5.66	160	144.80				0.35			
49	748226.671	9826470.914	3518.00			1.5	3516.50				5.7	0.00085090971163856	0.004814573		3568.73	50.73	Cumple

				30.54	5563.42			5.66	160	144.80				0.35			
50	748211.670	9826444.315	3522.00			1.5	3520.50				5.7	0.00085090971163856	0.002407286		3568.72	46.72	Cumple
				32.23	5595.65			2.83	160	144.80				0.35			
51	748204.807	9826412.826	3524.00			1.5	3522.50				5.7	0.00085090971163856	0.002407286		3568.72	44.72	Cumple
				35.31	5630.96			2.83	160	144.80				0.35			
52	748185.024	9826383.582	3526.00			1.5	3524.50				5.7	0.00085090971163856	0.001805465		3568.72	42.72	Cumple
				39.29	5670.25			2.12	160	144.80				0.35			
53	748154.083	9826359.361	3527.50			1.5	3526.00				5.7	0.00085090971163856	0.003117436		3568.72	41.22	Cumple
				30.01	5700.26			3.66	160	144.80				0.35			
54	748135.809	9826335.555	3530.09			1.5	3528.59				5.7	0.00085090971163856	8.4255E-05		3568.72	38.63	Cumple
				54.28	5754.54			0.10	160	144.80				0.35			
55	748088.815	9826308.295	3530.09			1.5	3528.59				5.7	0.00085090971163856	4.81457E-05		3533.09	3.00	Cumple
				34.39	5788.93			0.06	160	144.80				0.35			
56	748059.821	9826289.900	3530.05			1.5	3528.55				5.7	0.00085090971163856	0.002467468		3533.09	3.04	Cumple
				49.61	5838.54			2.90	160	144.80				0.35			
57	748013.004	9826273.505	3528.00			1.5	3526.50				5.7	0.00085090971163856	0.000601822		3533.09	5.09	Cumple
				125.08	5963.62			0.71	160	144.80				0.35			
58	747902.345	9826215.235	3528.50			1.5	3527.00				5.7	0.00085090971163856	0.007823681		3533.08	4.58	Cumple
				198.29	6161.91			9.19	160	144.80				0.35			
59	747734.412	9826109.813	3522.00			1.5	3520.50				5.7	0.00085090971163856	0.001203643		3533.08	11.08	Cumple
				91.57	6253.48			1.41	160	144.80				0.35			
60	747660.417	9826055.883	3521.00			1.5	3519.50				5.7	0.00085090971163856	0.010832788		3533.07	12.07	Cumple
				33.47	6286.95			12.73	160	144.80				0.35			
61	747627.946	9826047.698	3512.00			1.5	3510.50				5.7	0.00085090971163856	0.016851004		3533.05	21.05	Cumple
				23.62	6310.57			19.80	160	144.80				0.35			
62	747616.427	9826027.103	3498.00			1.5	3496.50				5.7	0.00085090971163856	0.008425502		3533.04	35.04	Cumple
				28.62	6339.19			9.90	160	144.80				0.35			
63	747593.512	9826009.915	3491.00			1.5	3489.50				5.7	0.00085090971163856	0.002407286		3533.04	42.04	Cumple
				56.11	6395.30			2.83	160	144.80				0.35			
64	747553.237	9825970.878	3489.00			1.5	3487.50				5.7	0.00085090971163856	0.002407286		3533.04	44.04	Cumple
				62.22	6457.52			2.83	160	144.80				0.35			
65	747503.303	9825933.731	3487.00			1.5	3485.50				5.7	0.00085090971163856	0.001203643		3533.04	46.04	Cumple
				62.64	6520.16			1.41	160	144.80				0.35			
66	747450.530	9825899.983	3486.00			1.5	3484.50				5.7	0.00085090971163856	0.008425502		3533.03	47.03	Cumple

				64.44	6584.60			9.90	160	144.80				0.35			
67	747398.251	9825862.307	3493.00			1.5	3491.50				5.7	0.00085090971163856	0.009568963		3533.02	40.02	Cumple
				47.80	6632.40			11.24	160	144.80				0.35			
68	747358.837	9825835.279	3493.00			1.5	3491.50				5.7	0.00085090971163856	0.013240075		3496.00	3.00	Cumple
				61.26	6693.66			15.56	160	144.80				0.35			
69	747313.932	9825793.588	3482.00			1.5	3480.50				5.7	0.00085090971163856	0.004814573		3496.00	14.00	Cumple
				4.53	6698.19			5.66	160	144.80				0.35			
70	747311.922	9825789.527	3478.00			1.5	3476.50				5.7	0.00085090971163856	0.004814573		3495.99	17.99	Cumple
				73.92	6772.11			5.66	160	144.80				0.35			
71	747382.341	9825767.062	3474.00			1.5	3472.50				5.7	0.74792331939247900	0.041611509		3495.95	21.95	Cumple
				97.82	6869.93			1.13	40	36.00				1.10			
72	747337.853	9825679.944	3474.80			1.5	3473.30				1.12	0.10894842727424800	0.21601632		3495.73	20.93	Cumple
				37.00	6906.93			8.20	32	28.80				0.80			
73	747300.956	9825682.692	3469.00			1.5	3467.50				0.52	0.02631217475714030	0.21601632		3495.52	26.52	Cumple
71			3474.00			1.5	3472.50				5.7	0.00085090971163856	0.00642141		3495.95	21.95	Cumple
				211.86	6983.97			11.31	160	144.80				0.28			
74	747584.642	9825704.133	3466.00			1.5	3464.50				4.58	0.00056746644782918	0.000786623		3495.95	29.95	Cumple
				175.27	7159.24			1.39	160	144.80				0.28			
75	747751.996	9825652.055	3465.02			1.5	3463.52				4.58	0.00056746644782918	0.001220068		3495.95	30.93	Cumple
				125.20	7284.44			2.15	160	144.80				0.28			
76	747871.212	9825613.854	3463.50			1.5	3462.00				4.58	0.00056746644782918	0.000401338		3495.95	32.45	Cumple
				165.26	7449.70			0.71	160	144.80				0.28			
77	748028.912	9825564.429	3463.00			1.5	3461.50				4.58	0.00949376033429620	0.021493969		3495.92	32.92	Cumple
				5.38	7455.08			2.26	90	81.20				0.88			
78	748029.217	9825559.057	3464.60			1.5	3463.10				4.58	0.16823878617986300	0.242626297		3495.68	31.08	Cumple
				37.00	7492.08			9.33	50	45.00				1.05			
79	748065.761	9825553.274	3458.00			1.5	3456.50				1.67	0.22830445622524600	0.385275333		3495.30	37.30	Cumple
				58.00	7550.08			7.07	32	28.80				1.18			
80	748097.571	9825504.776	3453.00			1.5	3451.50				0.77	0.05443448496188140	0.385275333		3494.91	41.91	Cumple
78			3464.60			1.5	3463.10				4.58	0.00949376033429620	0.073075892		3495.68	31.08	Cumple
				97.41	7552.49			17.82	90	81.20				0.56			
81	748036.629	9825461.847	3452.00			1.5	3450.50				2.91	0.21535249797221500	0.393499894		3495.29	43.29	Cumple
				62.00	7614.49			5.66	40	36.00				1.55			
82	747974.936	9825455.685	3448.00			1.5	3446.50				1.58	0.20604400043091700	0.286350215		3495.00	47.00	Cumple

				56.00	7670.49			5.66	32	28.80				1.14			
83	747919.049	9825459.240	3444.00			1.5	3442.50				0.74	0.05057233393362350	0.286350215		3494.72	50.72	Cumple
81			3452.00			1.5	3450.5				2.91	0.00409896674980836	0.014283555		3495.29	43.29	Cumple
				113.64	7666.13			14.85	90	81.20				0.26			
84	748054.091	9825349.552	3441.50			1.5	3440.00				1.33	0.14977225533072300	0.301080037		3494.99	53.49	Cumple
				70.00	7736.13			2.01	32	28.80				2.04			
85	747991.798	9825317.622	3440.08			1.5	3438.58				1.33	0.14977225533072300	0.05738823		3494.93	54.85	Cumple
				47.61	7783.74			1.53	32	28.80				0.97			
86	748033.540	9825294.718	3439.00			1.5	3437.50				0.63	0.03753919055626610	0.05738823		3494.87	55.87	Cumple
84			3441.50			1.5	3440.00				1.33	0.00096154185932819	0.004761185		3494.99	53.49	Cumple
				28.32	7694.45			4.95	90	81.20				0.26			
87	748060.459	9825321.973	3438.00			1.5	3436.50				1.33	0.00096154185932819	0.002720677		3494.98	56.98	Cumple
				35.59	7730.04			2.83	90	81.20				0.26			
88	748093.482	9825308.669	3436.00			1.5	3434.50				1.33	0.00096154185932819	0.001360339		3494.98	58.98	Cumple
				25.77	7755.81			1.41	90	81.20				0.26			
89	748119.002	9825305.210	3435.00			1.5	3433.50				1.33	0.00096154185932819	0.001360339		3494.98	59.98	Cumple
				27.21	7783.02			1.41	90	81.20				0.26			
90	748146.282	9825304.431	3434.00			1.5	3432.50				1.33	0.00096154185932819	0.000680169		3494.98	60.98	Cumple
				66.19	7849.21			0.71	90	81.20				0.26			
91	748212.337	9825300.492	3433.50			1.5	3432.00				1.33	0.00096154185932819	0.003400846		3494.98	61.48	Cumple
				99.84	7949.05			3.54	90	81.20				0.26			
92	748306.517	9825267.272	3431.00			1.5	3429.50				1.33	0.00096154185932819	0.001333132		3494.98	63.98	Cumple
				154.38	8103.43			1.39	90	81.20				0.26			
93	748420.672	9825163.344	3430.02			1.5	3428.52				1.33	0.00096154185932819	0.001333132		3494.98	64.96	Cumple
44			3524.00			1.5	3522.50				11.63	0.00318721233228754	0.001295134		3568.74	44.74	Cumple
				45.21	5263.33			1.41	160	144.80				0.36			
94	748526.098	9826486.635	3524.00			1.5	3522.50				5.93	0.00091558357824184	0.010361075		3527.00	3.00	Cumple
				132.28	5395.61			11.31	160	144.80				0.36			
95	748490.290	9826359.290	3516.00			1.5	3514.50				5.93	0.00091558357824184	0.014246478		3526.99	10.99	Cumple
				200.18	5595.79			15.56	160	144.80				0.36			
96	748437.842	9826166.104	3505.00			1.5	3503.50				5.93	0.00091558357824184	0.01813188		3526.97	21.97	Cumple
				217.73	5813.52			19.80	160	144.80				0.36			
97	748391.765	9825953.310	3491.00			1.5	3489.50				5.93	0.00566471547755894	0.023175299		3526.94	35.94	Cumple

				59.50	5873.02			16.97	110	99.60				0.35			
98	748381.169	9825894.762	3491.00			1.5	3489.50				2.75	0.00136513121883048	0.025106574		3494.00	3.00	Cumple
				114.36	5987.38			18.38	110	99.60				0.35			
99	748332.638	9825791.216	3478.00			1.5	3476.50				2.75	0.00136513121883048	0.019312749		3493.98	15.98	Cumple
				77.04	6064.42			14.14	110	99.60				0.35			
100	748316.482	9825715.889	3468.00			1.5	3466.50				2.75	0.00136513121883048	0.005793825		3493.97	25.97	Cumple
				25.34	6089.76			4.24	110	99.60				0.35			
101	748317.132	9825690.555	3465.00			1.5	3463.50				2.75	0.00136513121883048	0.001931275		3493.97	28.97	Cumple
				86.88	6176.64			1.41	110	99.60				0.35			
102	748280.147	9825611.948	3466.00			1.5	3464.50				2.75	0.00136513121883048	0.00386255		3493.97	27.97	Cumple
				95.75	6272.39			2.83	110	99.60				0.35			
103	748367.736	9825571.615	3464.00			1.5	3462.50				2.75	0.00136513121883048	0.004828187		3493.96	29.96	Cumple
				81.74	6354.13			3.54	110	99.60				0.35			
104	748442.522	9825538.629	3461.50			1.5	3460.00				2.75	0.00136513121883048	0.000579382		3493.96	32.46	Cumple
				5.38	6359.51			0.42	110	99.60				0.35			
105	748446.402	9825534.909	3461.80			1.5	3460.30				2.75	0.00136513121883048	0.007338845		3493.96	32.16	Cumple
				34.13	6393.64			5.37	110	99.60				0.35			
106	748476.831	9825519.445	3458.00			1.5	3456.50				2.75	0.00136513121883048	0.001931275		3493.95	35.95	Cumple
				82.12	6475.76			1.41	110	99.60				0.35			
107	748549.983	9825482.130	3459.00			1.5	3457.50				2.75	0.00369141070504966	0.001044595		3493.95	34.95	Cumple
				88.61	6564.37			0.28	90	81.20				0.53			
108	748629.278	9825442.571	3459.20			1.5	3457.70				2.75	0.00369141070504966	0.027159468		3493.93	34.73	Cumple
				50.99	6615.36			7.35	90	81.20				0.53			
109	748675.290	9825420.597	3459.20			1.5	3457.70				2.75	0.57498371109245300	0.774144671		3462.20	3.00	Cumple
				3.00	6618.36			20.01	32	28.80				0.98			
110	748676.618	9825423.287	3445.05			1.5	3443.55				0.64	0.03865008958079130	1.126659576		3461.07	16.02	Cumple
				48.50	6663.86			8.56	32	28.80				1.90			
111	748656.122	9825376.046	3439.00			1.5	3437.50				1.24	0.13154659151080000	0.530445568		3460.54	21.54	Cumple
				48.50	6712.36			11.31	32	28.80				1.09			
112	748636.954	9825331.494	3431.00			1.5	3429.50				0.71	0.04684130398007120	0.530445568		3460.01	29.01	Cumple
109			3454.00			1.5	3452.50				2.75	0.00369141070504966	0.013016155		3462.20	8.20	Cumple
				104.68	6720.04			29.70	90	81.20				0.17			
113	748768.882	9825373.710	3433.00			1.5	3431.50				0.87	0.00043813900802927	0.000309908		3462.20	29.20	Cumple
				5.47	6725.51			0.71	90	81.20				0.17			

114	748774.050	9825375.489	3432.50			1.5	3431.00				0.87	0.06824566891633510	0.531340258		3461.67	29.17	Cumple
				16.00	6741.51			7.78	32	28.80				1.34			
115	748779.258	9825360.360	3438.00			1.5	3436.50				0.87	0.06824566891633510	0.531340258		3461.14	23.14	Cumple
114			3432.50			1.5	3431.00				0.87	0.00043813900802927	0.002789176		3461.67	29.17	Cumple
				53.45	6778.96			6.36	90	81.20				0.17			
116	748824.362	9825393.540	3437.00			1.5	3435.50				0.87	0.00043813900802927	0.002479268		3461.67	24.67	Cumple
				84.54	6863.50			5.66	90	81.20				0.17			
117	748856.531	9825471.724	3433.00			1.5	3431.50				0.87	0.00043813900802927	0.002479268		3461.66	28.66	Cumple
97			3491.00			1.5	3489.50				5.93	0.00091558357824184	0.020829686		3526.94	35.94	Cumple
				128.49	6001.51			72.12	160	144.80				0.19			
118	748469.852	9825851.266	3440.00			1.5	3438.50				3.18	0.00028875919452818	0.002654764		3526.94	86.94	Cumple
				83.05	6084.56			9.19	160	144.80				0.19			
119	748527.326	9825791.318	3433.50			1.5	3432.00				3.18	0.00028875919452818	0.012865394		3526.93	93.43	Cumple
				40.41	6124.97			44.55	160	144.80				0.19			
120	748554.942	9825761.816	3465.00			1.5	3463.50				3.18	0.00483096506879321	0.034705167		3526.89	61.89	Cumple
				175.20	6300.17			48.79	90	81.20				0.22			
121	748566.923	9825587.024	3499.50			1.5	3498.00				1.13	0.00405345793412953	0.255241759		3526.64	27.14	Cumple
				117.00	6417.17			62.93	63	56.80				0.45			
122	748653.362	9825508.174	3499.50			1.5	3498.00				1.13	0.01260069735932240	0.044582489		3502.50	3.00	Cumple
				59.18	6476.35			3.54	50	45.00				0.71			
123	748711.565	9825497.468	3497.00			1.5	3495.50				1.13	0.03735788121395390	0.133996806		3502.37	5.37	Cumple
				49.00	6525.35			12.73	40	36.00				0.56			
124	748759.980	9825489.918	3488.00			1.5	3486.50				0.57	0.01051974523731300	0.133996806		3502.23	14.23	Cumple
120			3465.00			1.5	3463.50				3.18	0.00028875919452818	0.003260305		3526.89	61.89	Cumple
				158.40	6283.37			25.46	160	144.80				0.12			
125	748680.692	9825665.499	3483.00			1.5	3481.50				2.05	0.00012806698757792	0.00090564		3486.00	3.00	Cumple
				51.38	6334.75			7.07	160	144.80				0.12			
126	748725.962	9825641.206	3478.00			1.5	3476.50				2.05	0.00012806698757792	0.000271692		3486.00	8.00	Cumple
				53.44	6388.19			2.12	160	144.80				0.12			
127	748768.952	9825609.458	3476.50			1.5	3475.00				2.05	0.00012806698757792	9.0564E-05		3486.00	9.50	Cumple
				35.71	6423.9			0.71	160	144.80				0.12			
128	748798.326	9825589.144	3476.00			1.5	3474.50				2.05	0.00214257123297977	0.001194764		3486.00	10.00	Cumple
				116.44	6540.34			7.07	90	81.20				0.10			

129	748901.882	9825642.389	3471.00			1.5	3469.50				0.52	0.00016892486117059	0.001194764		3486.00	15.00	Cumple
128			3476.00			1.5	3474.50				2.05	0.00012806698757792	0.002001795		3486.00	10.00	Cumple
				13.99	6437.89			26.87	160	144.80				0.09			
130	748809.832	9825581.186	3457.00			1.5	3455.50				1.53	0.00007449659059704	0.000526788		3486.00	29.00	Cumple
				15.60	6453.49			7.07	160	144.80				0.09			
131	748821.332	9825570.647	3452.00			1.5	3450.50				1.53	0.00007449659059704	0.000632146		3486.00	34.00	Cumple
				76.89	6530.38			8.49	160	144.80				0.09			
132	748886.012	9825529.066	3452.00			1.5	3450.50				1.53	0.00007449659059704	0.000684825		3455.00	3.00	Cumple
				38.04	6568.42			9.19	160	144.80				0.09			
133	748913.302	9825502.570	3445.50			1.5	3444.00				1.53	0.00007449659059704	5.26788E-05		3455.00	9.50	Cumple
				86.97	6655.39			0.71	160	144.80				0.09			
134	748998.482	9825485.028	3445.00			1.5	3443.50				1.53	0.19413223169995700	0.902544025		3454.10	9.10	Cumple
				72.46	6727.85			16.97	32	28.80				1.17			
135	749012.253	9825556.170	3433.00			1.5	3431.50				0.76	0.05313258052526140	0.902544025		3453.19	20.19	Cumple
134			3445.00			1.5	3443.50				1.53	0.00124633408645758	0.00692122		3454.10	9.10	Cumple
				112.88	6768.27			19.80	90	81.20				0.15			
136	749105.212	9825448.254	3431.00			1.5	3429.50				0.77	0.00199218605472061	0.014094227		3454.08	23.08	Cumple
				60.52	6828.79			7.07	63	56.80				0.30			
137	749107.917	9825387.802	3431.00			1.5	3429.50				0.77	0.00199218605472061	0.019731918		3434.00	3.00	Cumple
				86.40	6915.19			9.90	63	56.80				0.30			
138	749112.662	9825301.534	3424.00			1.5	3422.50				0.77	0.00199218605472061	0.008456536		3433.99	9.99	Cumple
				104.81	7020.00			4.24	63	56.80				0.30			
139	749117.432	9825196.683	3421.00			1.5	3419.50				0.77	0.00199218605472061	0.005637691		3433.99	12.99	Cumple
				29.62	7049.62			2.83	63	56.80				0.30			
140	749118.872	9825167.094	3419.00			1.5	3417.50				0.77	0.05443448496188140	0.154110133		3433.83	14.83	Cumple
				3.00	7052.62			2.83	32	28.80				1.18			
141	749115.875	9825166.948	3417.00			1.5	3415.50				0.77	0.05443448496188140	0.154110133		3433.68	16.68	Cumple
140			3419.00			1.5	3417.50				0.77	0.00199218605472061	0.028188454		3433.83	14.83	Cumple
				161.26	7210.88			14.14	63	56.80				0.30			
142	749127.972	9825006.085	3409.00			1.5	3407.50				0.77	0.00199218605472061	0.028188454		3433.80	24.80	Cumple
136			3431.00			1.5	3429.50				0.77	0.00034947084001801	0.011864948		3454.08	23.08	Cumple
				127.89	6896.16			33.94	90	81.20				0.15			
143	749228.249	9825413.344	3407.00			1.5	3405.50				0.77	0.00034947084001801	0.008404338		3454.07	47.07	Cumple

				169.65	7065.81			24.04	90	81.20				0.15			
144	749392.823	9825372.048	3390.00			1.5	3388.50				0.77	0.00034947084001801	0.002966237		3454.07	64.07	Cumple
				15.23	7081.04			8.49	90	81.20				0.15			
145	749407.162	9825366.902	3384.00			1.5	3382.50				0.77	0.00034947084001801	0.001977491		3454.07	70.07	Cumple
				238.30	7319.34			5.66	90	81.20				0.15			
146	749561.832	9825185.619	3380.00			1.5	3378.50				0.77	0.00034947084001801	0.001977491		3454.07	74.07	Cumple

Fuente: Elaboración propia