

**ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD DE UNA
SUBUNIDAD Y CALIBRACIÓN DE EMISORES A RIEGO POR GOTEO PARA
EL CULTIVO DE VID. APLICACIÓN PRÁCTICA: COMUNIDAD DE SAN
ANTONIO - TARIJA**

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Actualmente la sociedad desea incrementar la producción de los productos agrícolas, más aún el conservar nuestros recursos hídricos y tener así un uso razonable de este; para ello la mejor manera de realizarlo es tener una buena planificación del manejo y gestión del agua.

Tras varios meses de angustia por la intensa sequía que afectó principalmente a la agricultura de Tarija, dirigentes campesinos y el presidente del Comité de Gestión de la Reserva de Sama, Renán Donaire, recalcan que priorizar el uso del agua para consumo humano y riego, en relación a otros usos o destinos, es clave para la conservación del líquido elemento, para las actuales y futuras generaciones, por lo que las autoridades llamadas por ley, instituciones públicas, privadas y el resto de la población están obligadas a protegerlo.

Los caudales de agua en el Rincón de la Victoria, el lago San Jacinto, los ríos Camacho, Pilcomayo, Tarija, entre otros, redujeron a niveles históricos afectando la biodiversidad. El río Guadalquivir, que en años pasados fue un atractivo turístico, quedó convertido en un riachuelo; así lo detalla el diario El País (Angelo 2022).

Para generar una mejora en el manejo de este recurso se optó por implementar los sistemas RLAF (Riego Localizados de Alta Frecuencia) en diferentes sitios del Valle Central de Tarija, teniendo como componente principal a los emisores de riego para la aplicación de agua al cultivo; donde estos son seleccionados en función al tipo de cultivo, lugar de aplicación, tamaño de la planta, entre otros factores. Por lo tanto, en este caso se opta por realizar un estudio específicamente a estos emisores de riego a goteo instalados en una viña del Valle Central de Tarija dedicada a las plantaciones de vid.

Bohórquez Caro (2014) refiere, que es importante que cada gota de agua que se aplica mediante el riego llegue de manera efectiva al cultivo, de una manera adecuada y no se

perdida por el camino. Una uniformidad adecuada a la hora de aplicar el agua al cultivo permite maximizar la producción, limitar las pérdidas por percolación profunda y hacer un uso eficiente del agua disponible. Por otro lado, los componentes de la instalación de riego han de estar en correcto estado y tener un funcionamiento adecuado.

Por tanto, realizar un estudio a estos elementos es de gran importancia en los sistemas RLAF¹ que nos lleva a conocer el comportamiento hidráulico que permite determinar la relación Presión – Caudal y el coeficiente de variación de fabricación de los emisores, parámetro que influye en el cálculo del coeficiente de uniformidad de los sistemas de riego (Gil Marín, Khan, y Hernández 2002).

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La falta de certeza de la uniformidad en la distribución del agua durante el periodo de irrigación en la subunidad de riego a goteo, genera un gran problema de incertidumbre sobre las causas para un mal desarrollo del crecimiento del cultivo, provocando en este caso que los frutos de la plantación de vid sean de baja calidad, ya sea en su tamaño o cantidad productiva.

Según Pizarro Cabello (1996), la uniformidad es una magnitud que caracteriza a todo sistema de riego y además que interviene en su diseño, tanto en el agronómico, pues afecta al cálculo de las necesidades totales de agua, como en el hidráulico, donde en función de ella se definen los límites entre los que se permite que varíen los caudales de los emisores. La necesidad de realizar esta investigación es debido a que, en el Valle Central de Tarija, más propiamente en la comunidad de San Antonio del municipio de Uriondo, en el vivero “El Carmen”, perteneciente a la familia Pinedo, se requiere estimar el coeficiente de uniformidad de una parcela de riego donde se cultivan plantines de vid.

Este cálculo de la uniformidad en la distribución del agua al cultivo es muy poco realizado en los sistemas de riego implementados en nuestro medio, debido a que durante la operación de estos sistemas no son tomados en cuenta por diferentes circunstancias, ya que en los primeros años de funcionalidad estos sistemas son muy eficientes y mejoran

¹ RLAF: Riego Localizado de Alta Frecuencia para sistemas tecnificados.

notablemente la producción de las fincas, pero al pasar los años, estos van deteriorándose por diferentes razones, además contemplan costos adicionales al proyecto en operación. Todas estas observaciones nos conllevan a la siguiente interrogante:

¿De qué manera se puede mejorar la distribución del agua en la subunidad para el cultivo de vid durante el periodo de riego y obtener una mayor uniformidad en la subunidad en estudio?

1.2. HIPÓTESIS

Mediante el monitoreo y recolección de caudales y presiones tomadas de las mediciones en los emisores a estudiar, se podrá realizar la calibración de los goteros obteniendo algunos parámetros característicos adoptados durante el diseño del sistema, para estimar el coeficiente de uniformidad en una subunidad del sistema de riego de la parcela seleccionada.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Estimar técnicamente el coeficiente de uniformidad en una subunidad de un sistema de riego a goteo para el cultivo de vid, y calibración de sus emisores, aplicada en la comunidad de San Antonio.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar en la parcela del vivero “El Carmen”, la subunidad de riego más representativa que presente características hidráulicas desfavorables para el funcionamiento del sistema.
- Identificar y corregir en la subunidad de estudio, las fallas de funcionamiento de las tuberías y emisores de riego que puedan provocar pérdidas de energía o caudales en la red de distribución (laterales).
- Seleccionar los emisores de riego, que representen a todos los goteros de la subunidad, utilizando la metodología de Merriam y Keller (1978) aplicable al área de estudio

seleccionado, para medir caudales utilizando el método volumétrico, y presiones por medio de un manómetro, necesarios para la estimación del coeficiente de uniformidad que determine cuan homogénea es la distribución del agua en la subunidad de estudio.

- Calibrar los emisores de riego por goteo mediante una muestra de goteros, seleccionados de la subunidad y obtener datos en mejores condiciones que las de campo, para analizarlos y graficar la curva de descarga característico de estos; y obtener los parámetros necesarios para calcular el coeficiente de uniformidad de la subunidad en estudio².
- Calcular el coeficiente de variación y el coeficiente de uniformidad de la subunidad, utilizando metodologías recomendadas por la literatura que determine el grado de dispersión de los caudales con respecto al caudal medio calculado durante la distribución del agua en la subunidad de estudio.

1.4. JUSTIFICACIÓN

En el valle central de Tarija, existen zonas con disponibilidad limitada de agua, lo que conlleva a una gran importancia del mantenimiento y funcionalidad adecuado de los elementos que conforman los sistemas de riego ya instalados, para así poder detectar y corregir oportunamente las fallas o deficiencias que puedan presentar durante la etapa de operación de estos sistemas y evitar riesgos de pérdida de cultivo o falencias de estos elementos en el periodo a cultivar.

De acuerdo con Jaén y Angélica (2019), la falta de certeza de las estimaciones de los efectos e impactos de los proyectos de riego, conduce a la búsqueda de sistemas en el cual exista una comparación entre lo previsto y lo real, permitan por un lado mejorar los sistemas y metodologías de evaluación, y por otro lado; realizar correcciones al proyecto durante su ejecución u operación, a fin de evitar la evolución hacia resultados desfavorables³.

² Parámetros necesarios para el cálculo del coeficiente de uniformidad son el exponente de descarga y el coeficiente de variación de fabricación.

³ Cabe recalcar que en este estudio se realizara un análisis a los emisores de riego a goteo, parte de una evaluación a un sistema durante su operación a tiempo real en la época crítico y más desfavorable para su funcionamiento.

Donde también nos menciona que las experiencias en evaluación Ex-post de proyectos⁴ son muy limitados y la escasez de documentos que señalen si existe impacto de las inversiones del Gobierno.

Por lo que según mencionan algunos autores, no existen estudios de evaluaciones a los sistemas de riego ya ejecutados en nuestro medio, y si los hay, son con poca información y por supuesto una escasez de datos sobre el coeficiente de uniformidad de estos sistemas.

1.5. DELIMITACIÓN

Para este estudio se realizará un análisis de verificación de parámetros hidráulicos de los emisores autocompensantes de un sistema de riego a goteo en una subunidad, y no se tomará en cuenta la las afecciones de la parte agronómica; con la finalidad de estimar el coeficiente de uniformidad solo en la subunidad.

1.5.1. LÍMITE TEMPORAL

De acuerdo a los datos necesarios para esta investigación, se realizó la toma de la muestra dentro del periodo de escasas de agua, durante los meses de agosto, septiembre y octubre de la presente gestión 2023.

Esta condición fue requerida por el administrador de la finca, ya que por declaraciones manifiesta, que es en este periodo donde tiene problemas con su sistema de riego, justamente por la deficiencia en el desarrollo del cultivo de vid, la restricción de la comunidad al uso del agua por su escasez durante ese tiempo y el cambio abrupto de las temperaturas durante el transcurso de los días.

⁴ La evaluación ex post, es entendida como el proceso que analiza los resultados de las intervenciones de los proyectos en los agricultores y sus sistemas de producción agropecuaria atemporal (en caso de proyectos nuevos) o con riego (en caso de proyectos de mejoramiento). Compara lo que se ha alcanzado con lo que se proponía alcanzar en un plan inicial (diseño final analizado en la evaluación ex ante).

1.5.2. LÍMITE GEOGRÁFICO

El área de estudio está ubicada en la comunidad de San Antonio perteneciente a la provincia José María Avilés del departamento de Tarija, sitio en el cual se realizarán las mediciones necesarias para dicha evaluación.

Departamento: Tarija

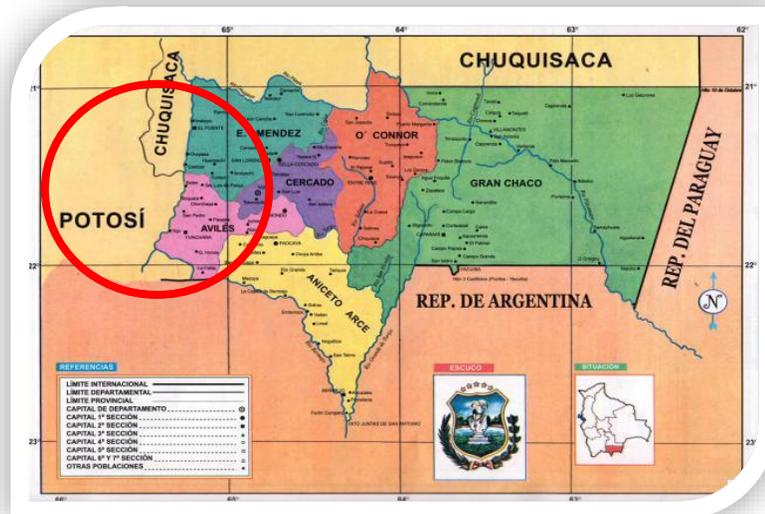


Figura 1: Mapa Político del Departamento de Tarija.

Fuente: <https://www.educa.com.bo/content/departamento-de-tarija>

Provincia: Avilez



Figura 3: Fotografía aérea de la parcela de estudio.

Fuente: Imagen satelital (Google Earth)

El estudio se realizará en una subunidad del vivero citado en la figura 3, denominado Lote I por los dueños del lugar, con una superficie de aproximadamente 0,932 hectáreas, que cuenta con una fuente de agua de tipo atajado no siendo así una limitante para el estudio.

CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE RIEGO LOCALIZADO DE ALTA FRECUENCIA

En los sistemas de RLAF, como ocurre en todas las nuevas tecnologías de rápida difusión, se presenta el problema de homogenizar la terminología. En este caso, empezando por el propio nombre. Así, el más divulgado, que es el riego por goteo, engloba para algunos a todos los riegos localizados de alta frecuencia, mientras que para otros es tan solo uno de los varios sistemas de esta clase de riegos. En nuestra opinión, el término “Riegos localizados de alta frecuencia” es el más adecuado para referirse al conjunto de estos sistemas de riego; dicho término tiene la ventaja de que se presta a pocas confusiones y al mismo tiempo indica sus dos características fundamentales: la localización y la alta frecuencia (Pizarro Cabello 1996).



Figura 4: Sistemas de riego localizado de alta frecuencia

Fuente: <https://www.portalfruticola.com/noticias/2018/08/02/tecnicas-fundamentales-para-establecer-un-programa-de-riego-eficaz/>

El uso de sistemas de riego tecnificados es crucial para el desarrollo de la actividad agrícola ya que aseguran una producción agrícola equilibrada en las explotaciones de las parcelas cultivadas. En este contexto, se puede observar que el rendimiento de los cultivos

está directamente relacionado con la satisfacción de las necesidades hídricas de las plantas. Por lo tanto, es importante que estos sistemas distribuyan el agua de la manera más uniforme posible durante el riego de las plantas.

Laura Apaza y López Blanco (2016), señalan que el interés de los sistemas de riego se debe a que reduce la exigencia de agua y los costos de operación. Este método de riego constituye una mejora en la aplicación del agua a la planta. Como toda innovación requiere de un manejo adecuado que garantice el retorno de la inversión, por tanto, es conveniente evaluar una instalación para comprobar los criterios de diseño y monitoreo de obturación en emisores mediante pruebas de Evaluación de Uniformidad.

2.1. VENTAJAS E INCONVENIENTES

En general, los sistemas de riego por goteo permiten no solo regar, sino también ahorrar agua a través de la regulación de la dosis de agua y la mantención eficiente de la humedad en los suelos de cultivo. Para lo que según Pizarro Cabello (1996), presenta a continuación algunas de las ventajas e inconvenientes de estos sistemas:

2.1.1. VENTAJAS AGRONÓMICAS

- Ahorro de agua, debido a varias causas:
Evapotranspiración bastante menor en árboles jóvenes; algo menor en adultos; pérdidas de agua prácticamente nulas en las conducciones, y reducidas en la aplicación de agua a las plantas; alta uniformidad de riego si el sistema está bien diseñado y mantenido; posibilidad de medición y control del agua de la operación del sistema.
- Alta frecuencia de riego, con estas dos consecuencias: Humedad del suelo permanentemente alta; salinidad del suelo menor, al estar las sales más diluidas.
- Posibilidad de aplicar la fertirrigación⁵, con estas ventajas:

⁵ La fertirrigación, es una metodología que permite la aplicación simultánea de agua y fertilizantes a través del sistema de riego. Se trata por tanto de aprovechar los sistemas RLA para aplicar los nutrientes necesarios a las plantas.

Ahorro de fertilizantes, mano de obra; mejor distribución y asimilación de fertilizantes en el tiempo y en el espacio; posibilidad de actuar rápidamente ante deficiencias.

- Aprovechamiento de suelos marginales:
Suelos muy permeables (arenas, gravas, rocas etc.); suelos poco permeables con problemas de falta de aireación; suelos con mucha pendiente; parcelas pequeñas de forma irregular; restauración de terraplenes, escombros, barrancos, etc.
- Mantenimiento del follaje seco, con estas ventajas:
Menos enfermedades en los cultivos; menor lavado de productos de tratamientos; con aguas salinas, se evita el quemado de las hojas; mayor calidad de algunos productos (p. ej. flores).
- Posibilidad de empleo de aguas de menor calidad:
Menor efecto osmótico con aguas salinas, al estar las sales más diluidas; lavado continuo del bulbo húmedo.
- Posibilidad de riego en cultivos acolchados⁶ o con microtúneles.
- Localización de malas hierbas, que se concentran en el área húmeda, lo que facilita su tratamiento.
- Menores interferencias con cosechas, tratamientos, viento, etc.
- Las instalaciones de fertirrigación permiten la aplicación de otros productos.

2.1.2. VENTAJAS ECONÓMICAS Y DE MANEJO

- Se necesita algo menos de presión que en aspersión.
- Menor gasto en energía, debido a los menores consumos de agua y a las menores necesidades de presión.
- Muy pocas necesidades de mano de obra para el manejo del riego.

⁶ El acolchado agrícola es una técnica agrícola que consiste en cubrir el suelo con filmes especiales cuyo objetivo es el de defender los cultivos y el suelo de los agentes atmosféricos, los cuales pueden producir desecación, deterioro de los frutos, enfriamiento de la tierra y arrastre de elementos fertilizantes, tan necesarios del desarrollo vegetativo. También influyen impidiendo el crecimiento de malas hierbas.

- Facilidad de la automatización.
- Facilidad de riego durante las 24 horas del día, lo que permite aprovechar las horas de energía barata.

Como consecuencia de algunas de estas ventajas, principalmente del mantenimiento de una alta humedad en el suelo y de la fertirrigación, en riego localizado los cultivos obtienen generalmente mayores rendimientos que con otros sistemas de riego.

2.1.3. INCONVENIENTES

- Facilidad de obturaciones de los emisores (este es el principal problema del riego localizado).
- Costo de las instalaciones. En comparación con la aspersión, el riego localizado generalmente es más caro para cultivos herbáceos (hortalizas principalmente) y algo más barato para cultivos arbóreos.
- Se necesita presión para su funcionamiento, a diferencia del riego por gravedad.
- Ocasiona el lavado localizado de las sales, creando zonas de acumulación salina. Donde la lluvia es insuficiente, o en invernaderos, cuando es necesario lavar las sales, hay que hacerlo por otros sistemas, como inundación o aspersión.
- No permite la defensa contra heladas.

2.2. EMISORES

Los emisores son dispositivos empleados en los sistemas de riego con el fin de garantizar una distribución uniforme del agua en el cultivo, permitiendo que el líquido salga de forma controlada en forma de gotas cerca de las raíces de las plantas. Estos emisores se colocan en línea con las plantas y se distribuyen a lo largo del sistema de riego. En este estudio en particular, nos referimos a los emisores de riego a goteo utilizados para el cultivo de vid.

Como afirma Pizarro Cabello (1996), estos dispositivos deben proporcionar un caudal bajo, con el objeto de que los diámetros de las tuberías portagotos (laterales) y terciarias (tuberías de conducción), sean reducidos; las grandes longitudes que de estas tuberías se

emplean en los RLAF hacen que un ligero incremento en su diámetro encarezca de forma importante la instalación del proyecto.

Por lo tanto, esto genera un incremento de la pérdida de carga que, en el caso de las tuberías laterales, puede llegar a eliminar por completo la sobrepresión en la entrada, dejando solamente la presión atmosférica al final de la tubería.

2.2.1. EMISORES DE RIEGO A GOTEO

Este método logra un humedecimiento directo al suelo por medio de fuentes de agua puntuales distribuidas en la unidad de riego y caracterizadas por tener una baja descarga. Se humedece únicamente una pequeña parte de la superficie total del suelo, regulando así el desarrollo del sistema radicular.

Según los autores Briceño, Barahona, y Alvares (2012); el término goteo se aplica, específicamente, para describir aquellos métodos en los cuales pequeños volúmenes de agua son aplicados directamente al suelo a intervalos cortos, empleando; emisores puntuales instalados a un espaciamiento fijo sobre laterales de pared delgada, cintas de goteo con salidas múltiples a corta distancia una de la otra.

El agua se transporta desde la fuente de suministro a través de tuberías y se libera gota a gota en el lugar exacto donde se encuentra la planta, esta se infiltra en el suelo, creando una zona húmeda limitada a un área específica que se extiende tanto vertical como horizontalmente, formando lo que se conoce como bulbo de humedad⁷ debido a su forma.

⁷ La forma del bulbo está condicionada en gran parte por el tipo de suelo. En los suelos pesados (de textura arcillosa), la velocidad de infiltración es menor que en los suelos ligeros (de textura arenosa), lo que hace que el charco sea mayor y el bulbo se extienda más horizontalmente que en profundidad. Si se aplica la misma cantidad de agua en tres suelos con texturas diferentes, la forma del bulbo variará.

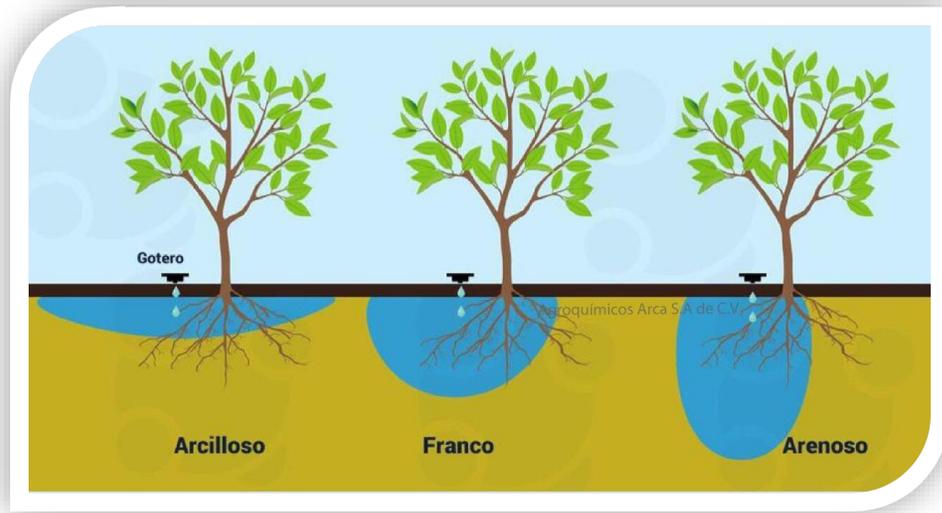


Figura 5: Bulbos húmedos según tipos de suelos

Fuente: <https://www.facebook.com/photo/?fbid=1551588451708077&set=a.1285340131666245>

2.2.2. CONDICIONES EXIGIBLES

a) Uniformidad en el caudal

Las variaciones de caudal con relación al teórico deben estar comprendidas en un $\pm 5\%$, en unas condiciones ideales de presión e instalación. Para ello se tienen que conocer los siguientes coeficientes o calcularlos:

Coeficiente de variación, atribuido a defectos de fabricación.

- Categoría A. La variación del caudal nominal es igual o inferior al 5 %.
- Categoría B. La variación del caudal nominal es igual o inferior al 10 %.
- Resto. La variación es superior al 10 %, por lo que son desechados por la gente que tiene una información y capacitación adecuada.

En el coeficiente de uniformidad, atribuido a defectos de instalación, no se debería superar el 10 % de diferencia de caudal entre el goteo de máxima y el de mínima (va incluido el coeficiente de variación).

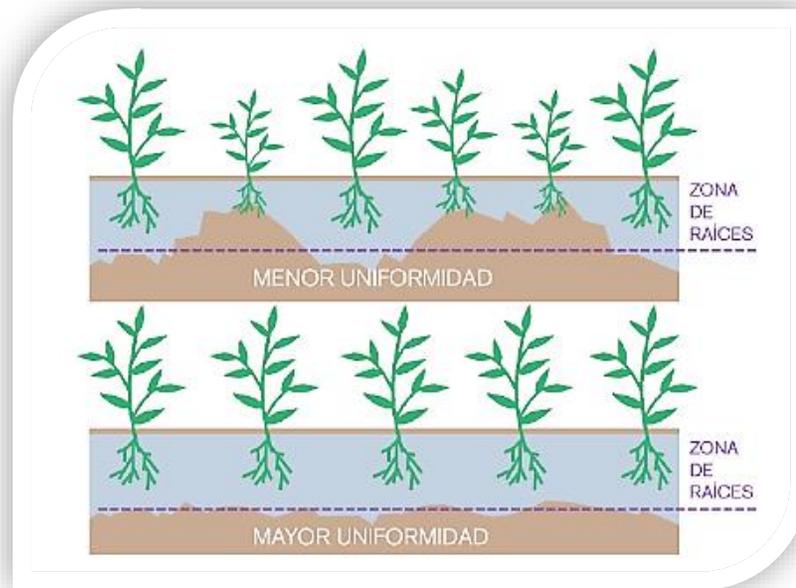


Figura 6: Uniformidad de riego

Fuente: https://www.researchgate.net/publication/283292663_Analisis_de_la_uniformidad_del_riego_en_cultivos_de_fresa_Agricultura

b) Adaptación al tipo de suelo

La elección del caudal depende del tipo de suelo, ya que se tiene que procurar que no se formen charcos, pero consiguiendo el máximo volumen mojado. En tierras arenosas, donde es muy difícil ampliar el volumen mojado, se elegirán los de máximo caudal y como la capacidad de retención es muy escasa, se regará en menos tiempo y más frecuencia. En las arcillosas se podrán instalar de bajo caudal, según conveniencias del proyecto a realizar.

c) Relación caudal/presión

Según esta relación, se puede comprobar la presión máxima y mínima que puede trabajar el emisor, para que la variación de caudal esté dentro de los límites tolerados. Este dato es necesario para el diseño de las laterales, pues las presiones no deben provocar una disminución del caudal nominal superior al 5 % (Moya Talens 2009).

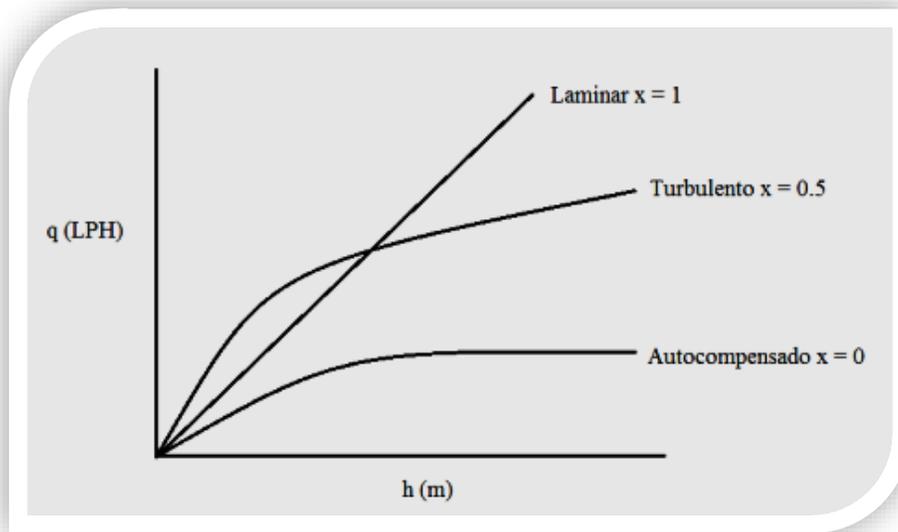


Figura 7: Relación Caudal – Presión

Fuente: (Pizarro Cabello 1996)

2.3. CLASIFICACIÓN DE EMISORES DE RIEGO POR GOTEO

Actualmente, existe una gran variedad de emisores de riego por goteo por lo que se las puede clasificar de distintas maneras, en función a las diferentes características que presentan estos. Para esta investigación, se optó por clasificarlos de la siguiente manera, según Pizarro Cabello (1996):

a) Goteros de largo conducto.

En el transcurso del tiempo, los goteros han ido experimentando cambios, pasando de ser microtubos a helicoidales y luego a de laberinto. Actualmente, los tres tipos de goteros coexisten en el mercado.

- El microtubo es el tipo de emisor más antiguo, no sólo entre los conductos largos, sino entre todos los tipos. Una de las principales características de este tipo de emisor es que el régimen hidráulico es generalmente laminar, resultando en un exponente de descarga igual a 1, demostrando una alta sensibilidad a las variaciones de presión y temperatura del agua en los microtubos.



Figura 8: Microtubo

Fuente: <https://www.poolaria.com/riego-goteo/2444-microtubo-flexible-marron-6x4mm.html>

- Los goteros helicoidales son una variante de los microtubos que se caracterizan por tener un tubo de una forma enrollada alrededor de un cilindro, lo que les proporciona una estructura más compacta. Por lo general, están fabricados en polipropileno⁸ al igual que la mayoría de los goteros.

Debido a la trayectoria helicoidal del agua, se generan fuerzas centrífugas que alteran la distribución parabólica de velocidades en el tubo, que es típica de las trayectorias rectas. Esta alteración es mayor a medida que aumenta la relación entre el diámetro del conducto y el de la hélice, lo que aleja el flujo hidráulico de la condición laminar. En consecuencia, el exponente de descarga x tiene valores cercanos a 0,65 - 0,75. Esto significa que los goteros helicoidales son menos susceptibles que los microtubos a las variaciones de temperatura, presión y obstrucciones.

⁸ Se trata de un material compacto y rígido con una buena resistencia a la tracción mecánica. Son muy ligeras y de fácil manipulación. Tienen una buena resistencia a los impactos. Son un buen aislante eléctrico y térmico.



Figura 9: Gotero helicoidal

Fuente: (Pizarro Cabello 1996)

- Los goteros de laberinto son el tipo más reciente en la evolución histórica de los goteros de largo conducto. En este tipo de goteros, el agua se ve obligada a seguir un camino tortuoso, lo que hace que funcionen en régimen turbulento ($x = 0.5$) y sean menos sensibles a la temperatura y a la presión y obstrucciones que los goteros helicoidales.



Figura 10: Goteros de laberinto

Fuente: <https://www.materialesriegos.com/Goteros-Turbulento-de-Interlinea>

b) Goteros de orificio

Se han llevado a cabo intentos de este tipo en los que se perforaban agujeros directamente en la tubería lateral. Sin embargo, esta solución no tuvo éxito debido a que los agujeros deben tener un diámetro muy pequeño. Esto hace que incluso una pequeña variación, que es inevitable con materiales plásticos que cambian con el tiempo, resulte en una distribución poco uniforme de los caudales. Por otro lado, existen goteros de polipropileno en los que el agua sale al exterior a través de un orificio específico, lo que permite disminuir la presión disponible. Estos goteros tienen un exponente de descarga de $x = 0,5$, lo cual indica que operan en régimen turbulento y poseen las ventajas asociadas a este tipo de flujo. Sin embargo, su principal desventaja es su reducido diámetro, lo que los hace propensos a obstrucciones.



Figura 11: Goteros de orificio

Fuente: <https://regaber.com/producto/gotero-boton/>

c) Goteros vortex

Trata de un tipo de gotero en el que el agua, una vez que atraviesa el orificio, se ve obligada a circular por una cámara de manera tangencial, generando un flujo en forma de remolino.

La fuerza centrífuga contrarresta la dirección del flujo y causa una pérdida de carga adicional a la del orificio. Esto implica que, para el mismo caudal, se requiere un diámetro mayor en el remolino.

La teoría del movimiento vorticial⁹ demuestra que cuando se incrementa la presión de entrada en un vortex, se produce una transformación de energía en velocidad y la presión en el centro aumenta en menor medida que en la periferia. Esto permite que los goteros vortex tengan una ligera autocompensación y su exponente de descarga sea aproximadamente $x=0,4$. Una particularidad de estos goteros es que su caudal disminuye al aumentar la temperatura del agua.



Figura 12: Gotero Vortex

Fuente: <https://regaber.com/producto/gotero-vortex/>

d) Goteros autocompensantes

Los emisores de este tipo incluyen un componente flexible, como una membrana de caucho, que se deforma debido a la diferencia de presión del agua antes y después de la membrana. Esto permite mantener un flujo casi constante, incluso si la presión de entrada

⁹ Un movimiento vorticial refiere a un flujo turbulento o laminar, en rotación alrededor de un eje con trayectorias de corriente circulares cerradas o helicoidales abiertas; si el fluido se mueve alrededor de un círculo, o en una hélice, o si tiende a una espiral alrededor de algún eje. Tal movimiento puede también ser llamado solenoidal.

varía. Los primeros emisores autorregulables eran del tipo de conexión en línea, pero actualmente existen varios modelos de tipo integrado. Un autorregulable perfecto tendría un exponente de descarga $x = 0$; sin embargo, en la práctica es muy difícil lograr esa condición y x siempre tiene un cierto valor (Pizarro Cabello 1996).

Un gotero autocompensante es una pieza fabricada en plástico generalmente de polipropileno o fibra por la que a través de una membrana proporciona una cantidad constante de agua, independientemente de la presión con la que el agua llega al gotero. Se emplea en sistemas de riego por goteo. En el mercado puedes encontrar diferentes modelos en función del rango de caudal de agua que quieres que suministre.

Además de ser costosos, el principal inconveniente de estos emisores es que el material del componente elástico se deteriora debido a las variaciones de temperatura y presión, así como a los productos químicos presentes en el agua de riego. Esto significa que, con el tiempo, algunos emisores dentro de la misma instalación pueden seguir funcionando correctamente mientras que otros no, lo que resulta en una distribución desigual del riego. Los emisores cuentan con una función de autolimpieza, que se activa al finalizar el riego cuando la presión disminuye. En este momento, el componente flexible se separa ligeramente, lo cual aumenta el flujo de agua y ayuda a eliminar las partículas acumuladas. El uso de este tipo de emisores en los sistemas de riego proporcionan un flujo de agua muy bajo (gota a gota), de esta manera, el riego se centra en la zona de las raíces o llamado también bulbo húmedo de los cultivos y se evita malgastar agua, ya sea en la formación de charcos o que esta se evapore.

La cantidad de agua concreta que sale del gotero autocompensante viene dada en las especificaciones del fabricante, de tal manera que puedes elegir el que más se adapte a las necesidades de tu cultivo.

Uso de los goteros autocompensantes.

Estos goteros son, sin duda, la mejor opción para el riego de cultivos y plantaciones grandes, así como en terrenos o parcelas con pendientes e irregularidades. Usar estos goteros autocompensantes da como resultado un riego mucho más controlado; se sabe de forma exacta la cantidad de agua que se está empleando durante el riego. A continuación, se citan las principales ventajas que pueden proporcionar estos goteros:

- Se consigue un riego uniforme incluso en terrenos con grandes cambios de altura, ya que con este sistema se compensan esas peculiaridades.
- Se pueden instalar los sistemas de riego en líneas muy largas. En este caso la diferencia de presión del agua no supone un problema porque estos goteros igualan las diferentes presiones de forma que sale el mismo caudal de agua desde el primer hasta el último gotero de la línea.
- Optimización en el uso del agua, suponiendo un ahorro para tu bolsillo y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental.



Figura 13: Viñas en terrenos irregulares con pendientes elevadas

Fuente: https://www.portalinmobiliario.com/MLC-1613876314-maravilloso-campo-placilla-con-vinas-vinateras-en-produccion-_JM

Diferencia entre un gotero autocompensante y uno turbulento.

La principal diferencia entre estos dos tipos de goteros, es la existencia de la membrana en el interior de los goteros autocompensantes; gracias a esta membrana, casi siempre proporcionan la misma cantidad de agua con independencia de los cambios de presión que

se produzcan en la red de distribución. En cambio, en los goteros turbulentos existe una mayor variación en su caudal dependiente mucho de la presión con la que el agua llega al gotero, por ende, tienen una menor uniformidad.

Estos goteros autocompensantes son mucho más caros que los turbulentos ya que cuentan con un sistema interior más sofisticado para compensar las diferentes presiones del agua.



Figura 14: Gotero autocompensante

Fuente: <https://regaber.com/producto/gotero-autocompensante/>

2.4. HIDRÁULICA EN LOS EMISORES

2.4.1. RÉGIMEN HIDRÁULICO DE LOS EMISORES

Según Pizarro Cabello (1996), en todo fluido en circulación existen unas fuerzas de inercia (según la ley de Newton, masa x aceleración) y unas fuerzas de rozamiento interno entre las partículas del fluido. La relación entre ambas fuerzas es un número adimensional, y en 1883 Osborne Reynolds comprobó que ese número permitía definir el régimen hidráulico. Este valor denominado número de Reynolds (Re), se deduce mediante la siguiente fórmula:

$$Re = \frac{d \cdot v}{\mu} \quad (1)$$

Donde;

d = diámetro (m)

v = velocidad del agua (m/s)

μ = viscosidad cinemática del agua (m²/s)

Sin embargo, la viscosidad cinemática es el resultado de la división entre la viscosidad dinámica (η) y la densidad del agua. Ambas propiedades del agua son muy propensas a variar debido al cambio de temperaturas que existen en el medio, por lo que se tiene la siguiente tabla de estas propiedades en función de la temperatura:

Tabla 1: Propiedades del agua

Temperatura °C	Peso Específico KN/m ³	Densidad Kg/m ³	Viscosidad	
			Dinámica Pa*s	Cinemática m ² /s
0	9,81	1000	17,50	17,50
5	9,81	1000	15,20	15,20
10	9,81	1000	13,00	13,00
15	9,81	1000	11,50	11,50
20	9,79	998	10,20	10,20
25	9,78	997	8,91	8,94
30	9,77	996	8,00	8,03
35	9,75	994	7,18	7,22
40	9,73	992	6,51	6,56
45	9,71	990	5,94	6,00
50	9,69	988	5,41	5,48
55	9,67	986	4,98	5,05
60	9,65	984	4,60	4,67
65	9,62	981	4,31	4,39
70	9,59	978	4,02	4,11
75	9,56	975	3,73	3,83
80	9,53	971	3,50	3,60
85	9,50	968	3,30	3,41
90	9,47	965	3,11	3,22
95	9,44	962	2,92	3,04
100	9,40	958	2,82	2,94

Fuente: (Mott y Untener 2015)

Cuando Re es menor a 2000, el régimen de flujo es laminar; para Re mayor de 4000, el flujo es turbulento; y para valores intermedios entre el régimen laminar y turbulento, el flujo puede comportarse de manera inestable o crítica, alternando entre laminar y turbulento (Saldarriaga 2007).

Es muy importante conocer esta característica hidráulica, ya que influye en la aplicación de distintas expresiones matemáticas que relacionan la presión con la velocidad. Sin embargo, también tiene unas consecuencias prácticas sobre el funcionamiento de los emisores, donde el régimen laminar no es conveniente para la funcionalidad de los mismos, por diferentes razones; tales como, la variación de las temperaturas tiene un efecto importante en la viscosidad cinemática, lo que provoca un aumento de caudal a lo largo del tendido de la tubería ocasionando una gran variación de caudales entre el primer y último emisor de las laterales¹⁰, para dar paso a una mala uniformidad de riego, lo cual no es la finalidad de esta metodología de riego.

2.4.2. ECUACIÓN DEL GOTERO

La relación entre el caudal y la presión en los emisores de riego puede ser expresada mediante la siguiente ecuación, dentro del rango de descargas deseado:

$$q = K * h^x \quad (2)$$

Donde;

q = Caudal emitido por el emisor (l/h).

K = Coeficiente de descarga, depende del tipo de boquilla y la forma de salida.

h = Presión de entrada del emisor (m).

x = Exponente de descarga del emisor. Caracteriza el régimen de flujo y el rango de autocompensación.

Para determinar **K** y **x** se debe conocer la curva de descarga de un gotero operando a dos diferentes presiones, eso en caso de que no se conozcan estos valores; por otro lado, para

¹⁰ Los autores Carmenantes, López y Mujica (2018), en su investigación de evaluación de emisores autocompensantes en los resultados de los estudios realizados al emisor de mayor variación de caudales en una lateral en función de la temperatura, difieren con mayor incremento cuando el agua alcanza una temperatura mayor a 39 °C, por lo que en esta investigación se obvia este tipo de estudio, ya que en nuestra zona de estudio las temperaturas radican mucho más bajas a las de mencionado estudio.

muchos emisores estándares estos valores se presentan en sus catálogos (Paul Hoogendam y Ríos 2008).

Sin embargo, el autor Pizarro Cabello (1996), recomienda la determinación experimental del valor de K, ya que en las citadas expresiones intervienen coeficientes cuyo valor adecuado a cada caso no es fácil de decidir.

El coeficiente de descarga x es una medida de la sensibilidad de los emisores a la variación de presión. Para ello se muestran algunos valores en la siguiente tabla:

Tabla 2: Coeficientes de descarga de emisores

Emisor	X
De régimen laminar	1 -
Microtubos	0,75 - 1
Helicoidal	0,65 - 0,75
De régimen Turbulento (orificio, de laberinto)	0,5
Vortex	0,4
Autocompensantes	0 - 0,40
Teórico perfectamente autocompensantes	0

Fuente: (Pizarro Cabello 1996)

Lo más importante es que los exponentes de descarga tengan un valor bajo, para poder obtener una mayor uniformidad de caudales posible y permitir una gran variación de presiones.

2.5 HIDRÁULICA EN LAS TUBERÍAS

Como dice el autor Saldarriaga (2007), para el flujo en tuberías actúan tres fuerzas: de presión, gravitacionales y de **fricción**; las primeras siempre tratan de acelerar el fluido; las gravitacionales (o de peso) tratan de acelerar el flujo, si este se mueve de una cota alta a una cota baja o tratan de frenarlo si el movimiento es en sentido contrario; y las fuerzas de fricción que siempre tratan de frenar el flujo. En el caso flujo uniforme, a través de una tubería con pendiente negativa en el sentido del flujo, existe un equilibrio entre fuerzas de fricción, por un lado, y las fuerzas gravitacionales y de presión, por el otro.

Para la determinación de las pérdidas de carga en tuberías circulares, se han deducido varias ecuaciones empíricas entre las más conocidas tenemos la ecuación de Darcy – Weisbach (1850). Para un flujo permanente, en un tubo de diámetro constante, la línea de cargas piezométricas es paralela a la línea de energía inclinada en la dirección del movimiento. Tomando en cuenta estas observaciones experimentales dedujeron una fórmula para calcular la pérdida de carga por fricción del flujo en un tubo:

$$hf = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g} \quad (3)$$

Donde;

hf = Pérdida de carga ocasionada por la fricción entre el tubo y el fluido

f = Factor de fricción, depende del tipo de material de la tubería y del tipo de flujo (número de Reynolds).

L = Longitud de la tubería

D = Diámetro de la tubería

v = Velocidad media del flujo

g = Aceleración de la gravedad

Para establecer el factor de fricción, se calcula mediante iteraciones, utilizando la fórmula empírica de Colebrook y White para zona de transición de flujo laminar a turbulento en tuberías comerciales:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left(\frac{\epsilon/D}{3,71} + \frac{2,51}{Re * \sqrt{f}} \right) \quad (4)$$

Donde;

f = Factor de fricción

ε = Rugosidad de la tubería, dependiente del tipo de material

D = Diámetro de la tubería

Re = Número de Reynolds

Que con base a estos resultados el investigador Moody preparó un diagrama universal, que lleva su nombre, para determinar el factor de fricción *f* en tuberías de rugosidad comercial que transportan cualquier líquido según el autor Sotelo Ávila (1997).

Este diagrama se encuentra ilustrado en el anexo 8 para su apreciación; la precisión en este diagrama universal de Moody depende de la selección de ϵ , según el material de que está construido el tubo.

2.5.1. COEFICIENTE DE CHRISTIENSEN

Para el cálculo de las pérdidas de carga es necesario considerar dos situaciones:

- a) Pérdida de carga en tuberías con salida al final, o sin salidas, el caudal que sale de la tubería es el mismo que entra, este es el caso de las tuberías de conducción o secundarias en riego por goteo.
- b) Pérdidas de carga en tuberías con salidas múltiples, el caudal que entra al inicio de la tubería se reparte en salidas a lo largo de esta, es el caso de las tuberías múltiples o laterales en riego por goteo, en estas tuberías las salidas se encuentran equidistantes.

Las pérdidas de carga en tuberías con una salida se pueden calcular directamente con la aplicación de la ecuación de Hazen William o cualquier otra ecuación empírica aplicable al caso. La pérdida de carga en tubería con salidas se calcula a partir de la aplicación de cualquiera de las distintas ecuaciones empíricas utilizadas para la estimación de pérdidas de carga y se le afecta por un factor denominado factor de salidas o coeficiente de Christiansen (F), el cual tiene un valor que depende del número de salidas y es menor que la unidad (Mendoza 2013).

Los valores de F pueden conocerse mediante el empleo de la tabla, cuando la primera derivación esté a una distancia del comienzo de la tubería (l_0), igual a la equidistancia (l) entre las derivaciones, es decir, ($l = l_0$); o bien cuando la primera derivación está situada a una distancia del comienzo del lateral igual a la mitad del espaciamiento entre derivaciones ($l_0 = l/2$).

A continuación, se presenta una tabla donde se pueden apreciar los valores del coeficiente de Christiansen para diferentes cantidades de salidas en la lateral:

Tabla 3: Coeficientes de Christiansen

n	10 =1					n	10 = ½				
	β=1.75	β=1.8	β=1.8	β=1.9	β=2.00		β=1.7	β=1.8	β=1.85	β=1.90	β=2.0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0.65	0.644	0.639	0.634	0.625	2	0.532	0.525	0.518	0.512	0.500
3	0.546	0.540	0.535	0.528	0.518	3	0.455	0.448	0.441	0.434	0.422
4	0.497	0.491	0.486	0.480	0.469	4	0.426	0.419	0.412	0.405	0.393
5	0.469	0.463	0.457	0.451	0.440	5	0.410	0.403	0.397	0.390	0.378
6	0.451	0.445	0.435	0.433	0.421	6	0.401	0.394	0.387	0.381	0.369
7	0.438	0.432	0.425	0.419	0.408	7	0.395	0.388	0.381	0.375	0.363
8	0.428	0.422	0.415	0.410	0.398	8	0.390	0.383	0.377	0.370	0.358
9	0.421	0.414	0.409	0.402	0.391	9	0.387	0.380	0.374	0.367	0.355
10	0.415	0.409	0.402	0.396	0.385	10	0.384	0.378	0.371	0.365	0.353
11	0.410	0.404	0.397	0.392	0.380	11	0.382	0.375	0.369	0.393	0.351
12	0.406	0.400	0.394	0.388	0.376	12	0.380	0.374	0.367	0.361	0.349
13	0.403	0.396	0.391	0.384	0.373	13	0.379	0.372	0.366	0.360	0.348
14	0.400	0.394	0.387	0.381	0.370	14	0.378	0.371	0.365	0.358	0.347
15	0.397	0.391	0.384	0.379	0.367	15	0.377	0.370	0.364	0.357	0.346
16	0.395	0.389	0.382	0.377	0.365	16	0.376	0.369	0.363	0.357	0.345
17	0.393	0.387	0.38	0.375	0.363	17	0.375	0.368	0.362	0.356	0.344
18	0.392	0.385	0.379	0.373	0.361	18	0.374	0.368	0.361	0.355	0.343
19	0.390	0.384	0.377	0.372	0.360	19	0.374	0.367	0.361	0.355	0.343
20	0.389	0.382	0.376	0.370	0.359	20	0.373	0.367	0.360	0.354	0.342
22	0.387	0.380	0.374	0.368	0.357	22	0.372	0.366	0.359	0.353	0.341
24	0.385	0.378	0.372	0.365	0.355	24	0.372	0.365	0.359	0.352	0.341
26	0.383	0.376	0.370	0.364	0.353	26	0.371	0.364	0.358	0.351	0.340
28	0.382	0.375	0.369	0.363	0.351	28	0.370	0.364	0.357	0.351	0.340
30	0.380	0.374	0.368	0.362	0.35	30	0.370	0.363	0.351	0.350	0.339
35	0.378	0.371	0.356	0.359	0.347	35	0.369	0.362	0.356	0.350	0.338
40	0.376	0.370	0.364	0.357	0.345	40	0.368	0.362	0.355	0.349	0.349
50	0.374	0.367	0.361	0.355	0.343	50	0.367	0.361	0.354	0.348	0.337
60	0.372	0.366	0.359	0.353	0.342	10	0.365	0.359	0.353	0.347	0.335
80	0.370	0.363	0.357	0.351	0.340	20	0.365	0.358	0.352	0.346	0.334
100	0.369	0.362	0.356	0.350	0.338						
150	0.367	0.360	0.354	0.348	0.337						
300	0.365	0.359	0.353	0.346	0.335						
>30	0.364	0.357	0.351	0.345	0.333						

n = Numero de salidas de la terciaria.	En la práctica se toma los siguientes valores de β :
β = 1,75. Blasius, Cruciani-Margaritora.	β = 1,75 para tuberías de PE.
β = 1,786. Scimeni.	β = 1,80 para tuberías de PVC.
β = 1,80. Iso, Veronese-Daite.	β = 1,85-1,90 para tuberías de aluminio.
β = 1,85. Hazen-Williams.	
β = 1,90. Scobey.	
β = 2,00. Manning, Darcy-Weisbach.	

Fuente: (Montalvo, T. 1989)

O también se puede estimar el coeficiente de Christiansen, utilizando la siguiente expresión:

$$F = \frac{1}{1 + \beta} + \frac{1}{2 * n} + \frac{\sqrt{\beta - 1}}{6 * n^2} \quad (5)$$

Donde;

F= Coeficiente de Christiansen.

n= Número de derivaciones (emisores).

β = Exponente de la fórmula de utilización de la pérdida de carga.

2.5. UNIFORMIDAD DE RIEGO

La uniformidad es una medida que define y afecta tanto al diseño agronómico como al hidráulico de un sistema de riego. En el aspecto agronómico, afecta al cálculo de las necesidades totales de agua, mientras que, en el aspecto hidráulico, define los límites dentro de los cuales se permite la variación de los caudales de los emisores.

El objetivo de implementar sistemas de riego localizado es lograr una óptima uniformidad, asegurando que cada planta del cultivo reciba la misma cantidad de agua y nutrientes esenciales para su crecimiento y máxima productividad.

2.5.1. COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD (C.U.)

Es un método elaborado por J.E. Christiansen, donde indica que tan iguales o desiguales son las tasas de aplicación de agua resultantes a través de los emisores. Un CU bajo indica que la aplicación de agua a través de los emisores es bastante diferente, mientras que un CU alto indica que el agua aplicada por los emisores es bastante similar entre ellas. El CU puede ser influenciado por el diámetro de la tubería, cambios en el sistema y sus componentes, tales como eficiencia de la bomba o regulación de la presión. Para que el valor de CU sea aceptable no debe de ser inferior a 88% ya que de ser más bajo representa un desperdicio de agua (Williams Chavarria 2011).

Sin embargo, se puede considerar que un CU del 85%, aun es aceptable según otras literaturas, para lo cual la podemos establecer mediante la siguiente relación:

$$\mathbf{CUD} = \frac{\mathbf{q_{25}}}{\mathbf{q_a}} \quad (6)$$

Donde;

CUD = Coeficiente de uniformidad de distribución

q₂₅ = Caudal de los emisores que constituyen el 25% de más bajo caudal

q_a = Caudal medio de todos los emisores

Esta expresión matemática es utilizada para la determinación de la uniformidad de riego en sistemas ya en funcionamiento, la cual es aplicada según metodologías recomendadas. Por otro lado, la uniformidad es una condición que se impone durante el diseño hidráulico del sistema, lo que origina a una expresión diferente, que toma en cuenta factores adicionales; como ser los constructivos. Para el cálculo de esta uniformidad se tiene la siguiente expresión:

$$\mathbf{CUD} = \left(\mathbf{1} - \frac{\mathbf{1,27*CV}}{\sqrt{\mathbf{e}}} \right) * \frac{\mathbf{q_{ns}}}{\mathbf{q_a}} \quad (7)$$

Donde;

CUD = Coeficiente de uniformidad de distribución del agua para el diseño de sistemas de riego

CV = Coeficiente de variación de fabricación.

e = Número de emisores que dota agua a una misma planta.

q_{ns} = Caudal del emisor sometido a menor presión¹¹.

q_a = Caudal medio de los emisores en diseño (caudal nominal establecido por el fabricante).

2.5.2. FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL C.U.

La uniformidad en la distribución del agua es un aspecto fundamental en los sistemas de riego, desde su diseño hasta su operación y mantenimiento a largo plazo. Varios factores influyen en la distribución de la uniformidad, pero los más destacados son los siguientes:

- En términos de construcción, los procesos de fabricación y los materiales utilizados hacen que los emisores de riego de un mismo modelo no sean idénticos entre sí, por lo tanto, proporcionan caudales diferentes para una misma presión de trabajo. Además, en el mercado existen diferentes tipos y calidades de emisores de riego, cuyo rendimiento a lo largo del tiempo puede variar considerablemente.

El autor Saldarriaga (2007), engloba todas estas características de físicas y constructivas en el parámetro denominado coeficiente de variación por fabricación.

- De tipo hidráulico, se refiere a la pérdida de energía ocasionadas por la fricción del agua en la red de tuberías, y las diferencias superficiales de la topografía donde se encuentra emplazado el sistema, durante su funcionamiento, ocasionando diferencias en el caudal emitido a las plantas; estas características deducen a un tipo de coeficiente de uniformidad hidráulico.
- En el diseño, el investigador Liotta (2015) advierte de que un inadecuado diseño del sistema, en particular en el filtrado, incide directamente en la obstrucción de emisores; asimismo las fallas en el diseño hidráulico de tuberías y laterales pueden someter al sistema a diferentes pérdidas de carga y a una variación de presiones no acordes al emisor seleccionado.
- Durante el envejecimiento y las obturaciones, es uno de los principales problemas que presentan los sistemas de riego a goteo, estos pueden ser producidos por causas;

¹¹ Es el caudal del emisor que tiene menor presión y por ende un caudal mínimo, se lo obtiene mediante la iteración durante el diseño de tal manera que el CU sea mayor al 90% establecido durante el diseño agronómico.

físicas, como son los sólidos en suspensión que suelen atravesar el sistema de filtrado; químicas, que forman composiciones en los orificios de los emisores produciendo taponamientos como lo hacen las sales; y biológicas, el crecimiento de algunos microorganismos o algas que se forman en el interior de las tuberías.

- En las diferencias de temperatura, intervienen principalmente en los emisores que tienen un flujo laminar, es decir, los que tienen un exponente x próximo a la unidad.

2.5.3. EVALUACIÓN DE C.U. EN OPERACIÓN

El objetivo del análisis de los sistemas de riego en operación es evaluar su eficiencia e identificar algunas áreas de mejora en caso de que carezcan de ellas. Además, ayuda a los ingenieros a diseñar nuevos sistemas de riego y facilita comparaciones entre varios sistemas nuevos y existentes.

La evaluación de los emisores implicará la recopilación de datos sobre su tipo y caudal nominal, el diámetro mínimo de paso de agua y los diversos tratamientos realizados para prevenir obstrucciones.

Mendoza Martínez (2013), recomienda que, para realizar la evaluación de la uniformidad de un sistema de riego, debe seleccionarse la unidad de riego más representativa que será aquella de tamaño medio, con pendientes representativas del terreno, localizada en la parte central del sistema y con líneas laterales de longitud media en relación al resto de laterales del sistema. Una vez seleccionada la unidad de riego representativa del sistema de riego, se procederá a realizar la prueba en una subunidad y después se calculará la uniformidad de todo el sistema de riego.

2.5.4. UNIFORMIDAD DE LA SUBUNIDAD DE RIEGO

Bohórquez Caro (2014) sugiere que, para estimar el coeficiente de uniformidad de una subunidad de riego funcional en campo, se elegirá un número determinado de emisores distribuidos uniformemente dentro de la subunidad de riego. Se recomienda seleccionar 16 emisores para calcular este coeficiente. Para ello, se eligen los laterales más cercanos y más lejanos de la toma de la tubería terciaria y los dos intermedios (los situados a un tercio y dos tercios). En cada lateral se seleccionan cuatro emisores siguiendo el mismo

criterio, es decir, el más cercano y el más lejano de la toma del lateral y los dos intermedios.

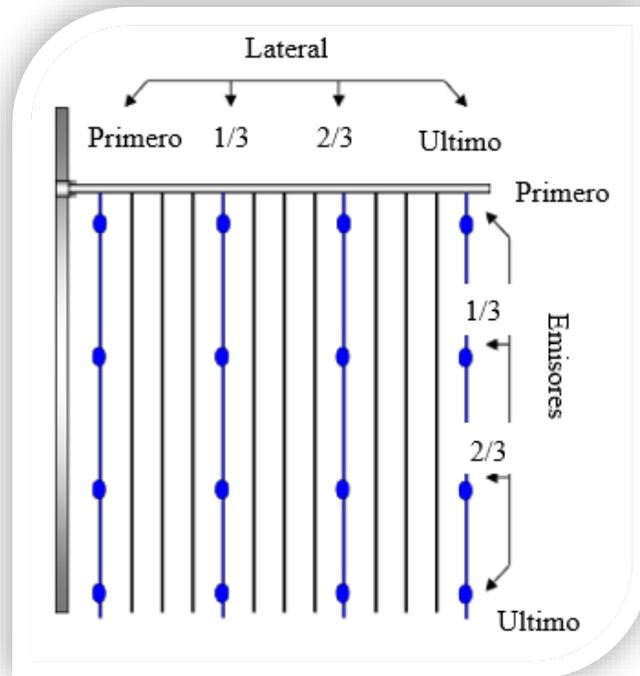


Figura 12: Modelo sugerido para la selección de emisores a analizar

Fuente: (Mendoza Martínez 2013)

Para evaluar la Uniformidad dentro de la subunidad se usan dos coeficientes: El Coeficiente de Uniformidad de Distribución de Caudales (CUD) y El Coeficiente de Uniformidad de Distribución de Presiones (CUDP), donde el CUD se calcula con la ecuación (6) y el CUDP se calcula con la siguiente expresión:

$$\mathbf{CUDP} = \left(\frac{P_{25}}{P_m} \right)^x \quad (8)$$

Donde;

CUDP = Coeficiente de uniformidad de distribución de presiones

P₂₅ = Media de las presiones medidas en los emisores que representan la cuarta parte de más baja presión

P_m = Media de las presiones medidas en todos los emisores

x = Exponente de descarga característico del emisor que debe ser facilitada por el fabricante u obtenida en banco de pruebas.

2.6. MANTENIMIENTO DE ELEMENTOS DE DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN SISTEMAS DE RIEGO A GOTEO

Un programa de mantenimiento incluye como medidas preventivas; limpiar los filtros, lavar las líneas, agregar cloro e inyectar ácidos al sistema, para evitar que los emisores se tapen, ya que los sólidos suspendidos, la precipitación de magnesio y calcio, los óxidos y el sulfuro de manganeso-hierro, las algas, las bacterias y las raíces de las plantas pueden tapar los emisores.

Es importante que el sistema tenga un medidor de caudal y un par de medidores de presión (manómetros), se recomienda colocar un manómetro antes de los filtros y otro después de los filtros. También es importante conocer las características del agua para que se puedan anticipar problemas.

2.6.1. EVALUACIÓN VISUAL DEL FUNCIONAMIENTO DE LATERALES Y EMISORES

El control se realiza de acuerdo con la experiencia del operador del sistema. Por lo general, en cada ciclo de riego se examina una parte del sistema, de tal manera que al finalizar cada semana se haya revisado todos los elementos que conforman el sistema de riego a goteo. Se debe comprobar la salida del agua por los primeros goteros de cada línea, lo que indica que el agua fluye por todos los laterales. Si se detecta una avería, es necesario revisar el segmento entre el primer gotero y el último.

Comprobar la llegada del agua a todos los finales de línea, lo que indica que no hay líneas cortadas ni estranguladas. Si se detecta una avería es necesario revisar en todo lo largo del lateral para encontrarla y repararla.

Las partículas muy finas pasan por los filtros y pueden tapar los emisores. Mientras que la velocidad del agua sea alta y haya turbulencia en el agua, estas partículas permanecerán suspendidas. Si la velocidad del agua se vuelve más lenta o si hay menos turbulencia en

el agua, estas partículas se sedimentarán, provocando así que los emisores disminuyan su caudal de emisión e incluso se taponen (Mendoza Martínez 2013)

Una manera de evaluar los problemas de taponamiento es colocar un recipiente debajo de algunos emisores como lo muestra la Figura 13. La cantidad de flujo de los emisores (volumen dividido entre el tiempo) recolectada en los distintos sitios debe de ser comparada con la cantidad de flujo especificada en el diseño.



Figura 13: Estimación del caudal de un gotero

Fuente: http://www.sepor.cl/informacion_cartillas/S111_Cartilla_Aforo_de_Aguas.pdf

La condición general de un sistema de goteo puede ser evaluada fácilmente al examinar frecuentemente las presiones del sistema y las cantidades de flujo. Si se tapan los emisores, las presiones del sistema van a aumentar y los flujos van a reducirse así lo redactan los autores Enciso, Porter, Bordovsky y Fipps en su artículo científico “Dándole mantenimiento a los sistemas subsuperficiales de riego por goteo” (2004).

2.6.2. LAVADO DE LA LÍNEA DE GOTEO

Para minimizar la acumulación de sedimentos, se recomienda el lavado regular de las tuberías de riego por goteo. El diseño del sistema debe ser tal que se pueda obtener una velocidad de descarga mínima de 1 ft/s. en las líneas. Las válvulas suficientemente grandes

para permitir una velocidad de flujo suficiente deben instalarse en los extremos de las líneas. Además, deben hacerse tolerancias de lavado en los extremos de las líneas laterales. El lavado de las líneas laterales de goteo debe continuar hasta que fluya agua limpia de la línea lavada durante al menos dos minutos. Se deberá abrir un número de mangueras que no pase del 10% del total de las mangueras por ocasión, para que no caiga la presión. Un programa regular de mantenimiento de inspección y lavado ayudará significativamente a prevenir la obstrucción del gotero (Netafim 2014).



Figura 14: Lavado de una lateral

Fuente: <https://www.campodebenamayor.es/limpieza-de-los-goteros-de-riego/>

2.6.3. TRATAMIENTO DE LATERALES INYECTANDO CLORO

Los autores Enciso, Porter, Bordovsky y Fipps (2004) señalan que los problemas más serios relacionados con las bacterias ocurren en aguas que contienen óxido de hierro o hierro soluble, o manganeso. Las concentraciones de hierro o manganeso mayores de 0.1 ppm y las concentraciones de manganeso mayores de 0.15 ppm pueden promover el crecimiento bacterial y la precipitación química que obstruye los emisores. El crecimiento bacterial en el hierro se observa de color rojizo mientras que el crecimiento bacterial en el manganeso se observa de negro. Estas bacterias oxidan el hierro y el manganeso del agua de riego. También recomiendan sobre el uso del cloro; ya que puede oxidar el manganeso disuelto y causar precipitación más allá del sistema de filtros.

La cloración es el método más común para tratar contaminantes orgánicos. El cloro activo es un oxidante fuerte y como tal, es útil para lograr lo siguiente:

- Prevenir la obstrucción y la sedimentación de sustancias orgánicas.
- Destruir y descomponer las bacterias del azufre y el hierro, así como el limo bacteriano acumulado en el sistema.
- Mejorar el rendimiento de los sistemas de filtración mientras se reduce el agua de lavado.
- Sistemas limpios de sedimentos orgánicos. (El cloro no tiene ningún efecto sobre los depósitos de incrustaciones).

Si la fuente de agua del sistema de riego no está clorada, es recomendable equipar el sistema para inyectar cloro y suprimir el crecimiento microbiano. Dado que las bacterias pueden crecer dentro de los filtros, la inyección de cloro debe ocurrir antes de la filtración. Los siguientes métodos son varios esquemas de inyección de cloro posibles:

- Inyectar continuamente a un nivel bajo para obtener una a dos ppm de cloro libre en los extremos de los laterales.
- Inyectar a intervalos (una vez al final de cada ciclo de riego) a concentraciones de 20 ppm y durante un tiempo suficiente para alcanzar el último gotero del sistema.
- Inyectar un tratamiento de babosas a altas concentraciones (50 ppm) semanalmente al final de un ciclo de riego y durante un tiempo suficiente para distribuir el cloro a través de todo el sistema de tuberías.

El método utilizado dependerá del potencial de crecimiento de los organismos microbianos, del método y equipo de inyección y de la programación de la inyección de otros productos químicos.

Si los emisores ya se encuentran parcialmente tapados por materia orgánica, un tratamiento de “supercloración” puede ser necesario; el mismo consiste en mantener una concentración de 200 a 500 ppm de cloro en el sistema durante 24 horas. Se debe inyectar un poco de cloro extra para compensar por el cloro que estará atado con el agua¹² (Netafim 2014).

¹² **ADVERTENCIA:** Las soluciones de cloro activo son peligrosas para los seres humanos y los animales. Cuando se usa cloro, se debe usar una protección adecuada para los ojos, las manos y las partes del cuerpo,

Pasos para efectuar la cloración

Para realizar una buena inyección de cloro al sistema el autor Mendoza Martínez (2013), recomienda seguir los siguientes pasos:

- a) Elegir la concentración deseada del cloro.
- b) Calcular el caudal requerido de la solución de cloro.
- c) Elegir una bomba compatible para inyección del cloro, diluir cloro y agua según el caudal de la bomba.
- d) Enviar el agua al área de cultivos y enjuagar correctamente el sistema, incluyendo líneas principales, líneas secundarias y laterales de goteo.
- e) Confirmar que la presión en el sistema esté estabilizada.
- f) Dejar fluir el cloro en el sistema.
- g) Revisar la concentración del cloro restante al final del sistema.
- h) Verificar que la concentración de cloro sea de acuerdo al nivel requerido. Si la concentración es demasiado baja, debe añadirse más cloro en la mezcla.
- i) Al final de la inyección, cerrar el agua en el área y esperar unas pocas horas, enjuagar correctamente la bomba.
- j) Después de unas pocas horas, enjuagar correctamente con agua limpia las líneas y los laterales de goteo.

2.6.4. TRATAMIENTO DE LATERALES INYECTANDO ÁCIDO

El tratamiento con ácidos tiene como objetivo diluir sedimentos calcáreos (carbonatos, hidróxidos, fosfatos, etc.) en el sistema de riego. Este tratamiento no resuelve problemas de sedimentos orgánicos.

Los ácidos son inyectados en el agua de riego para tratar el taponamiento causado por el carbonato de calcio (cal) y la precipitación de magnesio. El agua con un pH de 7.5 o más alto y un nivel de bicarbonato de más de 100 ppm tiene riesgo de presentar precipitación de minerales, dependiendo de la dureza del agua. La dureza del agua, la cual es

es decir, gafas protectoras, guantes, zapatos, etc. El contacto del cloro con la piel puede causar quemaduras graves, el contacto con los ojos puede causar ceguera y la deglución puede ser fatal. El contacto directo entre el cloro y el fertilizante puede crear una reacción térmica, que puede ser explosiva.

determinada por las concentraciones de calcio y magnesio, se clasifica como se expone seguidamente: suave (0 a 60 ppm de Ca y Mg); moderada (de 61 a 120); dura (de 121 a 180); muy dura (más de 180 ppm). El agua moderada, dura y muy dura necesita ser inyectada con ácido.

El ácido puede utilizarse para reducir el pH del agua de riego, reducir el potencial de precipitación química, y mejorar la eficacia de la inyección de cloro. Los ácidos sulfúrico, clorhídrico y fosfórico se utilizan para este propósito. El ácido se puede inyectar de la misma manera que el fertilizante; sin embargo, se requiere mucha precaución. La cantidad de ácido a inyectar depende de cuán químicamente básica (capacidad de amortiguación) sea el agua de riego y la concentración del ácido a inyectar. Un miliequivalente de ácido neutraliza completamente un miliequivalente de bases.

Si se inyecta ácido de forma continua para evitar que se formen precipitados de calcio y magnesio, se debe ajustar la velocidad de inyección hasta que el pH del agua de riego esté por debajo de 7.0. Si la intención de la inyección de ácido es eliminar la acumulación de incrustaciones existentes dentro del sistema de riego, el pH deberá bajarse aún más. La liberación de agua en el suelo debe ser minimizada durante este proceso, ya que se podría dañar la raíz de la planta. Se debe inyectar una porción de ácido en el sistema de riego y dejarlo en el sistema durante varias horas, después de lo cual el sistema debe ser lavado con agua de riego. El ácido es más eficaz en la prevención y disolución de incrustaciones alcalinas. Evite concentraciones que pueden ser dañinas para los goteros y otros componentes del sistema.

Los tubos de polietileno y PVC son resistentes al ácido. Las tuberías de aluminio, acero (con o sin revestimiento interior de hormigón) y de cemento de amianto pueden ser dañadas por la corrosión. En todos los casos, reanudar el flujo de agua normal a través del sistema después de completar el tratamiento durante al menos una hora para eliminar cualquier resto de ácido. La importancia del lavado no se puede enfatizar demasiado cuando las tuberías utilizadas son particularmente sensibles a la corrosión (Netafim 2014). El ácido usualmente se inyecta después del filtro para que no corra el mismo. Si el filtro está hecho de polietileno, el cual resiste la corrosión, el ácido se puede inyectar antes del

filtro. La cantidad de ácido a ser utilizada depende de las características del ácido que esté usando y de las características químicas del agua de riego.

El ácido debe inyectarse con una bomba fertilizante, resistente a estas sustancias. Es de suma importancia calibrar el caudal real de la bomba inyectora y conocer el caudal real que pasa por las diferentes secciones de riego. Esto permite aplicar la inyección con la concentración correcta.

Además de destapar los emisores tapados, el ácido inyectado en el agua de riego puede mejorar las características de infiltración de algunos suelos y liberar micronutrientes al reducir el pH del suelo. Para reducir el costo, se puede inyectar ácido solamente durante la última tercera parte del tiempo de riego.

Los ácidos son tóxicos y peligrosos para el ser humano¹³. Antes de usarlos se debe leer atentamente las instrucciones de seguridad del fabricante. Todas las instrucciones para el tratamiento con ácidos deben regirse a la legislación vigente en cada país y a las instrucciones del fabricante (Mendoza Martínez 2014).

Instrucciones de uso

- Limpie los filtros.
- Enjuague el sistema con agua limpia de la siguiente manera: enjuague las tuberías principales, luego las tuberías de distribución y finalmente las tuberías laterales de goteo. Utilice la presión más alta posible para el lavado. Desactive los reguladores de presión y limpie los laterales, unos cuantos a la vez. El enjuague con agua limpia evitará bloqueos durante el tratamiento.
- Compruebe la descarga del agua del sistema a través del cual se inyectará el ácido y la descarga de la bomba de fertilizante.
- Calcule la cantidad requerida de ácido que se debe inyectar en el sistema con el fin de obtener 0.6% de concentración de ácido en el agua de riego.

¹³ El contacto del ácido con la piel puede causar quemaduras, su contacto con los ojos puede provocar ceguera, la ingestión de ácidos o la inhalación de sus vapores pueden ser fatales. Para la manipulación de ácidos es necesario protegerse con gafas, guantes, mangas y pantalones largos, botas, etc. Hay que permanecer en el terreno durante todo el transcurso del tratamiento y se debe alejar del sitio a personas no autorizadas.

- Inyecte el ácido en el sistema quince minutos sólo después de que el sistema haya alcanzado la máxima presión de operación.

2.6.5. ENRAIZADO DE EMISORES

Es importante evitar que las raíces de las plantas penetren en los emisores de goteo (la Fig. 15, muestra un problema de intrusión de raíces). Las raíces de la plantación tienden a crecer hacia las áreas del suelo que tengan mayor contenido de humedad. Debido a esta tendencia, las raíces pueden obstruir los sistemas de goteo subsuperficiales creciendo en las aberturas del gotero.



Figura 15: Intrusión de raíces en el emisor

Fuente: [https://www.researchgate.net/profile/Guy-](https://www.researchgate.net/profile/Guy-Fipps/publication/26904496_Maintaining_Subsurface_Drip_Irrigation_Systems_Spanish/links/5564b89408aec4b0f48590b8/Maintaining-Subsurface-Drip-Irrigation-Systems-Spanish.pdf)

[Fipps/publication/26904496_Maintaining_Subsurface_Drip_Irrigation_Systems_Spanish/links/5564b89408aec4b0f48590b8/Maintaining-Subsurface-Drip-Irrigation-Systems-Spanish.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Guy-Fipps/publication/26904496_Maintaining_Subsurface_Drip_Irrigation_Systems_Spanish/links/5564b89408aec4b0f48590b8/Maintaining-Subsurface-Drip-Irrigation-Systems-Spanish.pdf)

Este es un problema específico de los sistemas que no se usan durante parte de la temporada (temporada de sequía). Se pueden emplear varias estrategias para reducir la posibilidad de intrusión de raíces:

1. Los riegos cortos frecuentes mantienen el agua adecuada en la zona de las raíces, por lo que las raíces no tienen necesidad de buscar el agua.

2. La inyección de ácido que disminuya el pH a menos de cuatro desalentará el crecimiento de raíces y se puede utilizar para limpiar las raíces de goteros que tengan pequeñas cantidades de intrusión de raíz. Las altas concentraciones de cloro (100 a 400 ppm), N-PHURIC, fosfórico o metam sodio (Vapam) también destruirán las raíces en goteros.
3. En las zonas donde se permite, la trifluralina es un inhibidor efectivo del crecimiento de raíces y puede utilizarse para prevenir la intrusión de raíces.
4. Las líneas de goteo cosidas alientan a las raíces a crecer a lo largo de las costuras y en el gotero.
5. El Metam Sodio y el Treflan son dos compuestos que controlan las raíces. En el algodón, el Metam Sodio es generalmente utilizado durante la defoliación para mantener las raíces fuera de los goteros a medida que el suelo se seca, mientras que el Treflan es utilizado antes de la cosecha.
6. La super cloración usando una dosificación de 400 ppm de cloro también mantendrá las raíces fuera. Llenando las cintas con cloro y dejándolas reposar durante la noche.

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN O ESTUDIO

Experimental: Mediante la toma de datos de volúmenes de agua, tiempos y presiones que se medirán en campo, se realizará el análisis de cada una de estas variables para la obtención de mediciones confiables; así obtener los respectivos caudales mediante el método volumétrico, y poder realizar el ajuste necesario para establecer la curva de descarga y su respectivo modelo matemático característico de los emisores, que permitirá conocer su comportamiento funcional de cada uno y establecer la variación y eficiencia de estos. Con lo que finalmente se realizará el ajuste de las presiones en las laterales para evaluar la uniformidad en la distribución del agua en la unidad de riego.

3.2. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 4: Operacionalización de variables

Objetivo	Variables	Definición	Indicadores	Técnica	Fuente	Herramienta
Realizar mediciones de volumen, tiempo, y presión, para varios emisores y laterales, en la unidad a analizar.	Volumen, Tiempo, y Presión	Conjunto de técnicas para la medición de los volúmenes, tiempo de flujo y presión de fluidos.	Volumen emitido por el gotero	Mediciones	Unidad de estudio ubicada en la comunidad de San Antonio.	Probeta
			Tiempo de emisión del gotero			Cronómetro
			Presión del emisor			Manómetro
Crear el modelo matemático	Modelo	Es un sistema donde todos	Caudal	Ajustes y Modela-	Resultados del análisis	Software Microsoft Excel

característico de cada emisor al análisis de datos medidos y consistentes generados en gabinete, aplicando métodos de análisis estadísticos.	los comportamientos u opciones se pueden simular por medio de ecuaciones matemáticas	Presión	ción de datos	estadístico de datos obtenidos en campo.
--	--	---------	---------------	--

Fuente: Elaboración propia

3.3. EQUIPOS Y MATERIALES

Para el trabajo realizado en campo se utilizaron los siguientes equipos y materiales:

- Una libreta con hojas tabuladas, para el apunte de las mediciones realizadas.
- Cinta métrica de 50 m, con una precisión de 1 cm
- Cronómetro con una precisión de 0,01 s
- Manómetro de glicerina con capacidad de 6,0 bares, con una precisión de 0,1 bares
- Probetas de 100 ml, con una precisión de 1 ml
- Termómetro de mercurio de 100 °C

3.4. PROCEDIMIENTO

Por recomendaciones del autor Bohórquez Caro (2014), que dice, que para evaluar la uniformidad de un sistema de riego localizado se elegirá la unidad de riego más representativa de la instalación. Una unidad representativa será aquella de tamaño medio, con una pendiente que represente la media de la instalación, que esté situada a ser posible

en una zona central y cuyos laterales tengan una longitud media. Se evaluará también, si se considera necesario, la unidad que represente las condiciones más desfavorables, es decir, la unidad más alejada o cercana al cabezal de riego, con laterales o tuberías terciarias más largas y con pendientes mayores. Por lo que se escogió la subunidad más alejada y elevada de la parcela.

En cuanto a la selección de laterales y emisores; Laura Apaza y López Blanco (2016) recomiendan que para la prueba de evaluación de uniformidad del sistema de riego se tome la metodología de Merriam y Keller (1978), que consiste en un número de 16 emisores, para lo que se elige cuatro laterales de una subunidad, el primero, el situado a $1/3$ del origen, el situado a $2/3$ y el último. En cada lateral se seleccionan cuatro plantas con el mismo criterio de las laterales.



Figura 16: Vivero “El Carmen”

Fuente: Elaboración propia

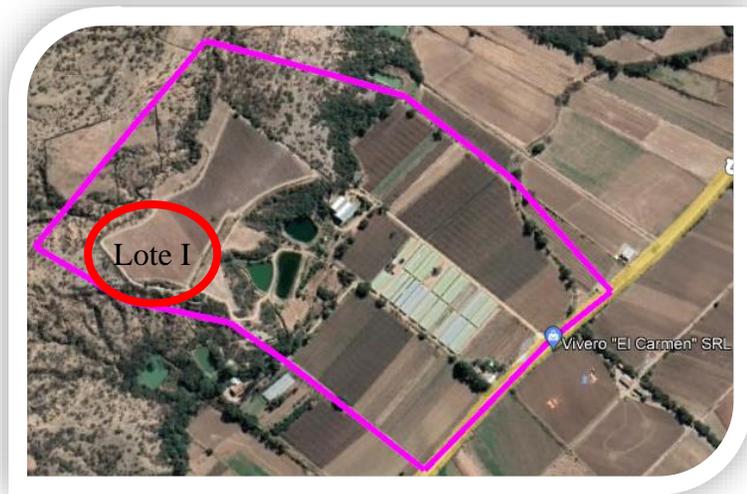


Figura 17: Selección de la subunidad denominada “Lote I”

Fuente: Elaboración propia

Una vez seleccionada ya la subunidad y los emisores a evaluar se procede con los siguientes pasos:

- Revisar una buena funcionalidad de la subunidad seleccionada, para evitar datos erróneos.



Figura 18: Revisión de elementos del cabezal de riego y limpieza de filtros

Fuente: Elaboración propia

- Realizar el mantenimiento respectivo antes de tomar las mediciones



Figura 19: Mantenimiento de tuberías terciaria y laterales

Fuente: Elaboración propia

- Realizar las mediciones de volumen, tiempo y presión, necesarias para el análisis.



Figura 20: Medición de volúmenes y presiones en la subunidad en estudio

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 4: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

A continuación, se presenta un esquema de la unidad de riego seleccionada:

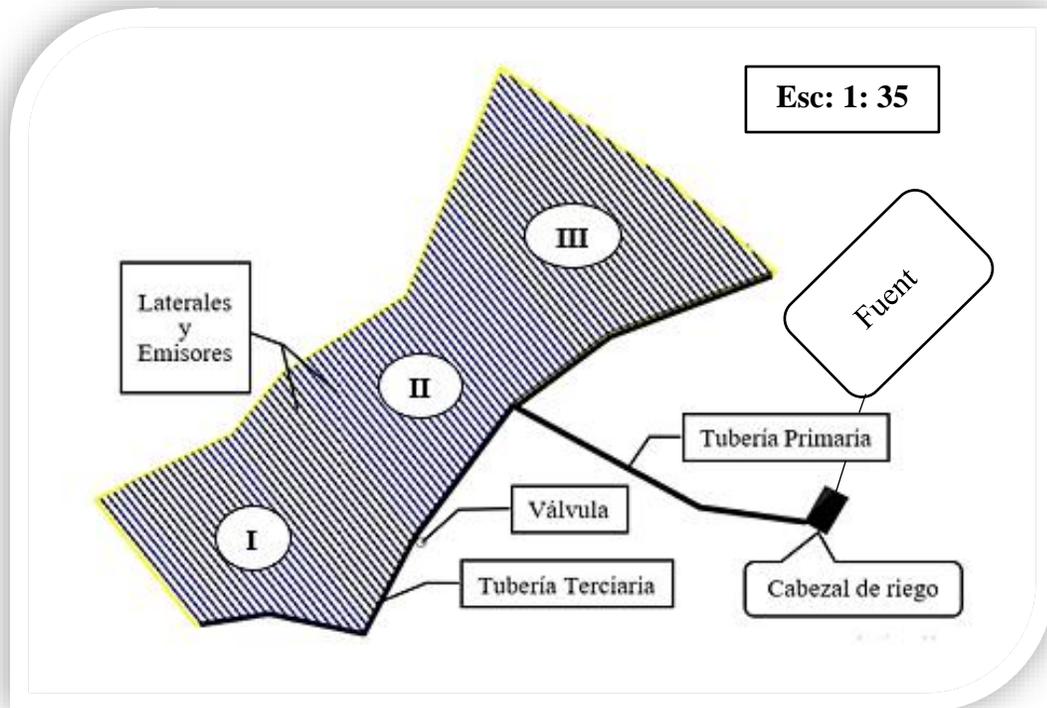


Figura 21: Esquema del sistema de la unidad de riego a analizar

Fuente: Elaboración propia

El estudio se realizó en la subunidad denominada “Lote I” en una superficie aproximada de 9322 m², cuenta con cultivo de plantaciones de vid de una edad aproximada de 5 años. Los emisores utilizados son de tipo interlinea autocompensados, los cuales están dentro de la lateral, separados a 0,60 m uno del otro, capaz de dotar de un caudal aproximado de 2,4 lts/h, a su vez con unas laterales de 16 mm de diámetro de tubería PE (Polietileno) para una capacidad de carga de 4 bares; y una tubería secundaria de 3 pulgadas de PVC (Policloruro de Vinilo) y una llave de paso 3 pulgadas, utilizada para desviar el flujo del agua cuando cambie el turno de regado a las otras subunidades. El agua es conducida a

esta terciaria a través de una tubería primaria que tiene las mismas características de la secundaria.



Figura 22: Subunidad seleccionada

Fuente: Elaboración propia

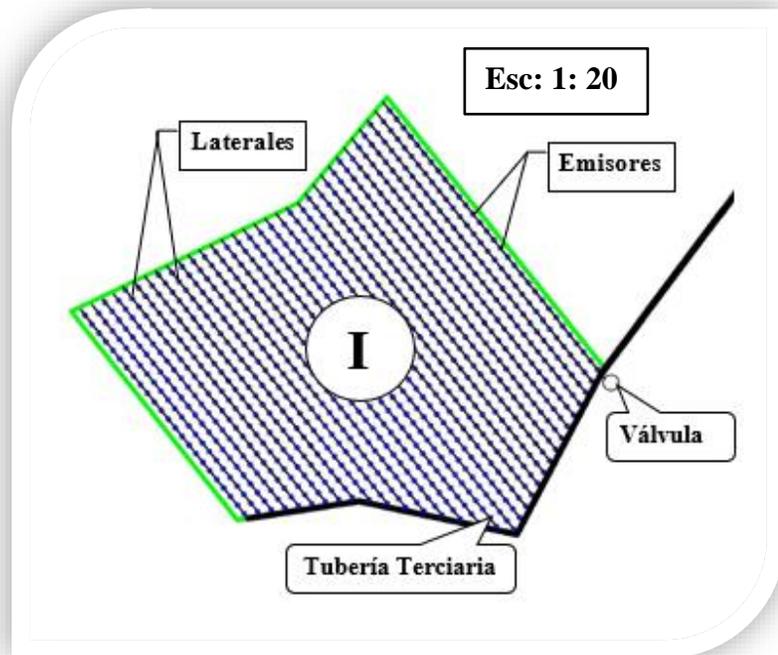


Figura 23: Esquema del sistema de la subunidad de riego a analizar

Fuente: Elaboración propia

El sistema cuenta con un cabezal de riego que comprenden de una bomba de marca City Pampa, que tiene una potencia de 5,5 HP, con la que dota de energía al sistema, existe otra bomba de 3,40 HP, utilizada para la dosificación de los fertilizantes la cual inyecta estos a través de una tubería conectada al sistema; donde se realiza la dosificación de fertilizantes en dos tanques de 5000 lts. Por otro lado, también podemos encontrar un filtro de marca NETAFIM, la cual evita el ingreso de las partículas flotantes o sedimentarias que suelen encontrarse en la fuente de agua. Y finalmente para elementos de control, solo cuenta con dos manómetros de glicerina de una capacidad de medir 6,0 bares, un purgador de aire y un panel de control de automatización del sistema, sin embargo, se observa que no funciona de manera automática por la falta de un operador.



Figura 24: Esquema del cabezal de riego

Fuente: Elaboración propia



Figura 25: Fuente de agua del sistema (tipo atajado)

Fuente: Elaboración propia

Mas adelante se podrán observar las fotografías individuales de cada uno de estos elementos que componen el sistema (Anexo 6).

4.1. RECOPIACIÓN DE DATOS

Para nuestra recogida de datos se adoptó el siguiente sistema sugerido por Bohórquez Caro (2014), donde en la figura 27 se puede observar cómo están distribuidos los 16 emisores en la subunidad a estudiar.



Figura 26: Emisor autocompensantes tipo interlinea utilizado en la subunidad

Fuente: Elaboración propia

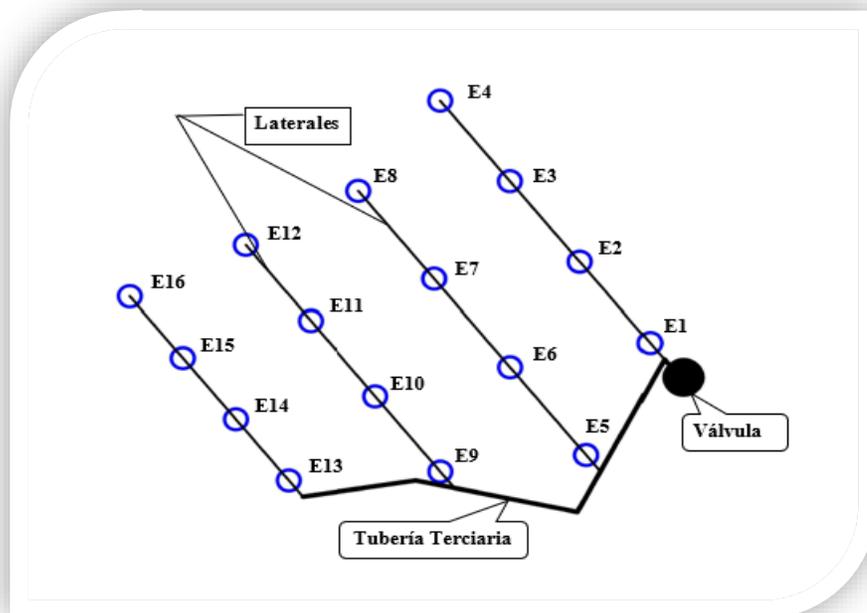


Figura 27: Distribución de los emisores en la subunidad de riego

Fuente: Elaboración propia



Figura 28: Medición de los caudales y presiones en la subunidad de riego

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en las siguientes tablas se presentan los resúmenes de las mediciones realizadas durante el proceso de recolección¹⁴:

Tabla 5: Medición de volúmenes [ml]

Nro.	Fecha	T	Emisores															
		^o C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	25/08/2023	16	96	99	96	94	93	99	91	69	73	74	81	79	78	75	74	75
2	29/08/2023	21	85	62	76	84	73	91	81	59	75	51	59	65	91	57	68	59
3	01/09/2023	16	75	104	92	79	91	85	63	49	86	85	74	87	69	55	91	75
4	04/09/2023	20	72	94	98	100	81	74	91	100	58	97	94	98	81	100	75	71

¹⁴ Cabe aclarar que cada medición fue realizada de manera independiente; es decir, no se tomó un tiempo o volumen fijo establecido para repetir las mediciones, por lo que en este caso se observan valores muy diferentes para el mismo emisor; sin embargo, se observa en la tabla 7, de caudales que cada emisor tiene valores similares, y si existen algunos diferentes se debe a algunos errores cometidos durante la medición de estos.

5	05/09/2023	17	89	94	57	64	65	52	55	89	62	55	62	73	79	72	62	61
6	06/09/2023	22	68	59	87	72	77	91	53	65	58	93	71	80	59	53	60	83
7	07/09/2023	18	91	56	78	84	73	80	92	83	95	52	50	57	82	73	71	71
8	08/09/2023	18	51	61	54	56	54	58	57	58	58	60	60	58	58	63	51	62
9	09/09/2023	23	93	56	84	93	82	76	91	82	84	87	78	76	51	53	61	74
10	11/09/2023	18	99	78	98	74	85	90	80	83	59	72	72	94	82	58	53	64
11	12/09/2023	22	69	95	82	61	67	69	82	71	81	92	87	72	82	88	85	71
12	13/09/2023	17	89	96	82	75	95	66	54	62	57	59	81	65	70	79	81	91
13	14/09/2023	21	98	65	91	82	84	59	76	59	53	79	87	83	83	59	96	69
14	15/09/2023	18	58	59	56	59	55	77	76	60	83	99	81	80	59	80	68	63
15	16/09/2023	21	62	79	89	60	83	74	82	88	58	54	52	69	59	52	72	84
16	18/09/2023	19	74	83	95	80	62	54	90	58	73	63	62	92	83	63	58	57
17	19/09/2023	23	85	95	65	63	92	81	88	68	62	78	70	91	58	65	84	73
18	20/09/2023	18	85	60	85	85	91	80	59	51	53	75	72	63	69	88	50	54
19	21/09/2023	20	87	64	93	79	75	86	75	72	69	89	79	64	60	57	88	58
20	22/09/2023	19	57	64	72	73	92	83	71	88	100	61	69	82	63	62	81	84
21	23/09/2023	21	56	117	81	53	61	70	87	45	72	57	61	67	73	60	69	70
22	25/09/2023	18	99	83	72	50	69	83	52	78	52	66	84	91	72	79	55	76
23	26/09/2023	19	61	61	83	90	100	65	58	89	57	86	88	81	70	64	80	84
24	27/09/2023	11	73	94	79	71	77	51	84	75	92	80	68	70	62	92	83	70
25	28/09/2023	14	75	91	81	89	97	74	96	92	84	71	80	87	80	69	62	62
26	29/09/2023	21	65	68	110	58	78	73	70	88	58	74	67	70	80	59	61	58
27	30/09/2023	20	71	80	52	68	71	68	76	89	84	73	87	82	57	48	70	56
28	02/10/2023	20	64	63	54	61	80	74	75	76	65	84	60	80	72	45	63	70
29	03/10/2023	20	69	58	87	57	54	56	56	72	75	62	82	58	72	75	61	76

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6: Medición de tiempos [min]

Nro.	Fecha	Emisores															
		T °C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

1	25/08/2023	16	2,67	2,61	2,62	2,50	2,55	2,66	2,46	1,81	1,97	1,94	2,16	2,11	2,10	2,09	2,10	2,10
2	29/08/2023	21	2,42	1,71	2,02	2,22	1,97	2,43	2,27	1,60	2,08	1,42	1,63	1,74	2,42	1,50	1,90	1,60
3	01/09/2023	16	2,17	2,77	2,58	2,05	2,60	2,29	1,74	1,28	2,23	2,26	2,14	2,36	1,81	1,43	2,41	1,97
4	04/09/2023	20	2,04	2,58	2,66	2,79	2,32	1,96	2,38	2,86	1,55	2,53	2,48	2,57	2,13	2,67	1,95	2,04
5	05/09/2023	17	2,55	2,50	1,60	1,71	1,80	1,38	1,49	2,34	1,71	1,47	1,64	1,91	2,13	1,89	1,65	1,72
6	06/09/2023	22	1,96	1,57	2,39	1,94	2,09	2,44	1,41	1,72	1,52	2,45	1,91	2,16	1,58	1,40	1,57	2,32
7	07/09/2023	18	2,58	1,51	2,09	2,20	2,06	2,12	2,43	2,16	2,51	1,42	1,41	1,52	2,18	1,94	1,87	2,03
8	08/09/2023	18	1,55	1,66	1,52	1,50	1,52	1,52	1,52	1,54	1,52	1,58	1,57	1,52	1,53	1,64	1,52	1,63
9	09/09/2023	23	2,74	1,50	2,39	2,54	2,28	2,02	2,45	2,20	2,23	2,34	2,05	2,02	1,37	1,46	1,79	2,00
10	11/09/2023	18	2,83	2,10	2,78	2,01	2,31	2,44	2,16	2,23	1,57	1,91	1,90	2,49	2,13	1,56	1,55	1,71
11	12/09/2023	22	1,98	2,54	2,27	1,61	1,86	1,84	2,16	1,86	2,15	2,42	2,51	1,94	2,18	2,34	2,50	1,97
12	13/09/2023	17	2,59	2,59	2,33	2,07	2,59	1,73	1,41	1,62	1,52	1,53	2,13	1,73	1,86	2,08	2,35	1,71
13	14/09/2023	21	2,93	1,77	2,53	2,20	2,39	1,63	2,05	1,59	1,42	2,07	2,28	2,20	2,23	1,56	2,74	1,84
14	15/09/2023	18	1,66	1,59	1,67	1,54	1,54	2,08	2,03	1,59	2,18	2,57	2,10	2,14	1,53	2,12	1,88	1,77
15	16/09/2023	21	1,75	2,16	2,51	1,59	2,27	2,03	2,22	2,32	1,52	1,45	1,37	1,87	1,58	1,38	2,02	2,39
16	18/09/2023	19	2,15	2,21	2,69	2,11	1,74	1,43	2,41	1,54	1,94	1,66	1,71	2,43	2,19	1,73	1,58	1,63
17	19/09/2023	23	2,47	2,56	1,82	1,75	2,55	2,16	2,33	1,82	1,70	2,10	1,87	2,40	1,55	1,76	2,36	2,02
18	20/09/2023	18	2,41	1,64	2,45	2,27	2,52	2,19	1,61	1,39	1,41	2,07	1,90	1,65	1,80	2,37	1,42	1,49
19	21/09/2023	20	2,52	1,75	2,72	2,14	1,99	2,30	2,07	1,90	1,88	2,33	2,11	1,73	1,60	1,54	2,42	1,66
20	22/09/2023	19	1,64	1,71	2,03	2,06	2,55	2,23	1,95	2,28	2,87	1,63	1,83	2,15	1,65	1,62	2,20	2,21
21	23/09/2023	21	1,76	3,01	2,18	1,39	1,64	1,86	2,33	1,20	1,94	1,50	1,59	1,75	1,93	1,59	1,97	1,82
22	25/09/2023	18	2,99	2,19	2,05	1,34	2,01	2,18	1,37	2,09	1,42	1,76	2,22	2,46	1,88	2,08	1,60	2,00
23	26/09/2023	19	1,79	1,60	2,27	2,39	2,95	1,70	1,53	2,34	1,50	2,25	2,35	2,12	1,85	1,67	2,31	2,29
24	27/09/2023	11	2,07	2,45	2,19	1,89	2,04	1,33	2,28	1,96	2,41	2,12	1,83	1,88	1,64	2,44	2,40	1,87
25	28/09/2023	14	2,10	2,45	2,19	2,39	2,74	2,00	2,55	2,44	2,25	1,86	2,12	2,32	2,13	1,85	1,80	1,71
26	29/09/2023	21	1,25	1,85	1,15	1,61	1,20	1,98	1,92	1,27	1,55	1,91	1,66	1,77	1,14	1,56	1,60	1,55
27	30/09/2023	20	1,15	1,18	1,48	1,78	1,05	1,88	1,09	1,32	1,18	1,89	1,16	1,05	1,52	1,28	1,82	1,50
28	02/10/2023	20	1,82	1,75	1,54	1,59	2,31	2,04	2,03	1,95	1,69	2,17	1,53	2,02	1,85	1,22	1,68	1,85
29	03/10/2023	20	1,52	1,56	2,43	1,48	1,56	1,53	1,50	1,84	1,95	1,63	2,10	1,52	1,93	2,09	1,83	2,00

Fuente: Elaboración propia



Figura 29: Obtención de los caudales y presiones en planilla

Fuente: Elaboración propia

Obtenida así las muestras de volúmenes y tiempos para cada emisor de riego; por consiguiente, se procede a estimar los caudales medidos en cada fecha de cada gotero seleccionado. Este proceso se realizó mediante la siguiente expresión matemática:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (8)$$

Donde;

Q = Caudal del emisor [lts/h]

V = Volumen obtenido en las probetas [lts]

t = Tiempo que tardó en llenar la probeta [h]

Nota: Cabe recalcar que se realizaron las respectivas conversiones para la ejecución de esta fórmula.

Tabla 7: Estimación de caudales [lts/h]

Nro.	Fecha	T °C	Emisor															
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	25/08/2023	16	2,16	2,28	2,20	2,26	2,19	2,23	2,22	2,29	2,22	2,29	2,25	2,25	2,23	2,15	2,11	2,14
2	29/08/2023	21	2,11	2,18	2,26	2,27	2,22	2,25	2,14	2,21	2,16	2,15	2,17	2,24	2,26	2,28	2,15	2,21

3	01/09/2023	16	2,07	2,25	2,14	2,31	2,10	2,23	2,17	2,30	2,31	2,26	2,07	2,21	2,29	2,31	2,27	2,28
4	04/09/2023	20	2,12	2,19	2,21	2,15	2,09	2,27	2,29	2,10	2,25	2,30	2,27	2,29	2,28	2,25	2,31	2,09
5	05/09/2023	17	2,09	2,26	2,14	2,25	2,17	2,26	2,21	2,28	2,18	2,24	2,27	2,29	2,23	2,29	2,25	2,13
6	06/09/2023	22	2,08	2,25	2,18	2,23	2,21	2,24	2,26	2,27	2,29	2,28	2,23	2,22	2,24	2,27	2,29	2,15
7	07/09/2023	18	2,12	2,23	2,24	2,29	2,13	2,26	2,27	2,31	2,27	2,20	2,13	2,25	2,26	2,26	2,28	2,10
8	08/09/2023	18	1,97	2,20	2,13	2,24	2,13	2,29	2,25	2,26	2,29	2,28	2,29	2,29	2,27	2,30	2,01	2,28
9	09/09/2023	23	2,04	2,24	2,11	2,20	2,16	2,26	2,23	2,24	2,26	2,23	2,28	2,26	2,23	2,18	2,04	2,22
10	11/09/2023	18	2,10	2,23	2,12	2,21	2,21	2,21	2,22	2,23	2,25	2,26	2,27	2,27	2,31	2,23	2,05	2,25
11	12/09/2023	22	2,09	2,24	2,17	2,27	2,16	2,25	2,28	2,29	2,26	2,28	2,08	2,23	2,26	2,26	2,04	2,16
12	13/09/2023	17	2,06	2,22	2,11	2,17	2,20	2,29	2,30	2,30	2,25	2,31	2,28	2,25	2,26	2,28	2,07	3,19
13	14/09/2023	21	2,01	2,20	2,16	2,24	2,11	2,17	2,22	2,23	2,24	2,29	2,29	2,26	2,23	2,27	2,10	2,25
14	15/09/2023	18	2,10	2,23	2,01	2,30	2,14	2,22	2,25	2,26	2,28	2,31	2,31	2,24	2,31	2,26	2,17	2,14
15	16/09/2023	21	2,13	2,19	2,13	2,26	2,19	2,19	2,22	2,28	2,29	2,23	2,28	2,21	2,24	2,26	2,14	2,11
16	18/09/2023	19	2,07	2,25	2,12	2,27	2,14	2,27	2,24	2,26	2,26	2,28	2,18	2,27	2,27	2,18	2,20	2,10
17	19/09/2023	23	2,06	2,23	2,14	2,16	2,16	2,25	2,27	2,24	2,19	2,23	2,25	2,28	2,25	2,22	2,14	2,17
18	20/09/2023	18	2,12	2,20	2,08	2,25	2,17	2,19	2,20	2,20	2,26	2,17	2,27	2,29	2,30	2,23	2,11	2,17
19	21/09/2023	20	2,07	2,19	2,05	2,21	2,26	2,24	2,17	2,27	2,20	2,29	2,25	2,22	2,25	2,22	2,18	2,10
20	22/09/2023	19	2,09	2,25	2,13	2,13	2,16	2,23	2,18	2,32	2,09	2,25	2,26	2,29	2,29	2,30	2,21	2,28
21	23/09/2023	21	1,91	2,33	2,23	2,29	2,23	2,26	2,24	2,25	2,23	2,28	2,30	2,30	2,27	2,26	2,10	2,31
22	25/09/2023	18	1,99	2,27	2,11	2,24	2,06	2,28	2,28	2,24	2,20	2,25	2,27	2,22	2,30	2,28	2,06	2,28
23	26/09/2023	19	2,04	2,29	2,19	2,26	2,03	2,29	2,27	2,28	2,28	2,29	2,25	2,29	2,27	2,30	2,08	2,20
24	27/09/2023	11	2,12	2,30	2,16	2,25	2,26	2,30	2,21	2,30	2,29	2,26	2,23	2,23	2,27	2,26	2,08	2,25
25	28/09/2023	14	2,14	2,23	2,22	2,23	2,12	2,22	2,26	2,26	2,24	2,29	2,26	2,25	2,25	2,24	2,07	2,18
26	29/09/2023	21	3,12	2,21	5,74	2,16	3,90	2,21	2,19	4,16	2,25	2,32	2,42	2,37	4,21	2,27	2,29	2,25
27	30/09/2023	20	3,70	4,07	2,11	2,29	4,06	2,17	4,18	4,05	4,27	2,32	4,50	4,69	2,25	2,25	2,31	2,24
28	02/10/2023	20	2,11	2,16	2,10	2,30	2,08	2,18	2,22	2,34	2,31	2,32	2,35	2,38	2,34	2,21	2,25	2,27
29	03/10/2023	20	2,72	2,23	2,15	2,31	2,08	2,20	2,24	2,35	2,31	2,28	2,34	2,29	2,24	2,15	2,00	2,28

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, para complementar los datos muestrales, se presentan en la siguiente tabla los valores de las presiones medidas durante el periodo de medición de los 16 emisores, sin embargo, se advierte que las presiones de las laterales ubicadas a un tercio y dos tercios de la misma, no se pudieron tomar, debido a que no se podía perforar las tuberías porque no se contaba con la aprobación ni el permiso de los dueños de la parcela.

Por lo que mediante el cálculo de pérdidas de carga y estimaciones de coeficientes se pudo estimar dichas presiones. Para ello se utilizaron distintas fórmulas recomendadas por el autor Gilberto Sotelo Ávila (1997), entre ellas las de cálculo de pérdidas de carga:

Para el cálculo de pérdidas de carga se utilizó la fórmula (3) de Darcy-Weisbach, universal utilizada para cualquier tipo de tubo y flujo.

$$hf = F * f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g} \quad (3)$$

Donde;

hf = Pérdida de carga ocasionada por la fricción entre el tubo y el fluido

F = Coeficiente de Christiansen, dependiente de la distancia del primer emisor, del número de emisores y del tipo de material de la tubería.

f = Factor de fricción, depende del tipo de material de la tubería y del tipo de flujo (número de Reynolds).

L = Longitud de la tubería

D = Diámetro de la tubería

v = Velocidad media del flujo

g = Aceleración de la gravedad

Para establecer el factor de fricción, se lo puede obtener mediante el uso del Diagrama de Moody o como en este caso se calculó mediante iteraciones, se utilizó la fórmula (4) de Colebrook y White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left(\frac{\epsilon/D}{3,71} + \frac{2,51}{Re * \sqrt{f}} \right) \quad (4)$$

Donde;

f = Factor de fricción

ε = Rugosidad de la tubería, dependiente del tipo de material

D = Diámetro de la tubería

Re = Número de Reynolds

Y finalmente el número de Reynolds con la fórmula (1) ya mencionada.

Tabla 8: Medición de presiones [Bares]

Nro.	Fecha	T °C	Emisores															
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	25/08/2023	16	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,2	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,6
2	29/08/2023	21	1,6	1,6	1,6	1,3	1,4	1,4	1,3	1,0	1,1	1,1	1,1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6
3	01/09/2023	16	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,3	1,1	1,1	1,1	1,1	0,8	0,9	0,9	0,9	0,7
4	04/09/2023	20	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,3	1,1	1,2	1,2	1,2	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7
5	05/09/2023	17	1,6	1,6	1,6	1,4	1,5	1,5	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	0,9	1,0	1,0	1,0	0,7
6	06/09/2023	22	1,5	1,5	1,5	1,3	1,4	1,4	1,3	1,2	1,3	1,3	1,3	1,0	1,0	1,0	1,0	0,7
7	07/09/2023	18	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	0,9	1,0	1,0	1,0	0,7
8	08/09/2023	18	1,5	1,5	1,5	1,3	1,2	1,2	1,1	0,9	1,0	1,0	1,0	0,7	0,8	0,8	0,8	0,6
9	09/09/2023	23	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,1	1,3	1,3	1,3	1,0	1,0	1,0	1,0	0,6
10	11/09/2023	18	1,6	1,6	1,6	1,4	1,5	1,5	1,4	1,2	1,3	1,3	1,3	0,9	1,0	1,0	1,0	0,7
11	12/09/2023	22	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,3	1,1	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	0,6
12	13/09/2023	17	1,4	1,4	1,4	1,3	1,4	1,4	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	0,8	0,9	0,9	0,9	0,6
13	14/09/2023	21	1,5	1,5	1,5	1,3	1,4	1,4	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	0,8	1,0	1,0	1,0	0,7
14	15/09/2023	18	1,5	1,5	1,5	1,3	1,2	1,2	1,1	0,8	0,9	0,9	0,9	0,6	0,7	0,7	0,7	0,5
15	16/09/2023	21	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	0,9	1,0	1,0	1,0	0,6
16	18/09/2023	19	1,6	1,6	1,6	1,4	1,5	1,5	1,4	1,2	1,3	1,3	1,3	0,9	1,0	1,0	1,0	0,6
17	19/09/2023	23	1,6	1,6	1,6	1,4	1,5	1,5	1,4	1,1	1,3	1,3	1,3	0,9	1,0	1,0	1,0	0,6
18	20/09/2023	18	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,3	1,1	1,2	1,2	1,2	0,8	0,9	0,9	0,9	0,5
19	21/09/2023	20	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,2	1,3	1,3	1,3	1,0	1,0	1,0	1,0	0,7
20	22/09/2023	19	1,6	1,6	1,6	1,4	1,4	1,4	1,3	1,1	1,1	1,1	1,1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,6

21	23/09/2023	21	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,3	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6
22	25/09/2023	18	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,2	1,3	1,3	1,3	0,9	1,0	1,0	1,0	0,6
23	26/09/2023	19	1,6	1,6	1,6	1,4	1,5	1,5	1,4	1,2	1,3	1,3	1,3	0,8	1,0	1,0	1,0	0,7
24	27/09/2023	11	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,3	1,1	1,2	1,2	1,2	0,8	0,9	0,9	0,9	0,6
25	28/09/2023	14	1,6	1,6	1,6	1,4	1,5	1,5	1,4	1,1	1,3	1,3	1,3	0,9	1,0	1,0	1,0	0,7
26	29/09/2023	21	1,7	1,7	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,3	1,2	1,2	1,2	1	0,9	0,9	0,9	0,7
27	30/09/2023	20	1,7	1,7	1,6	1,5	1,6	1,6	1,5	1,1	1,3	1,3	1,3	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7
28	02/10/2023	20	1,8	1,8	1,7	1,6	1,4	1,4	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,5
29	03/10/2023	20	1,4	1,4	1,3	1,2	1,1	1,1	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,4

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

En base a las mediciones proporcionadas en el capítulo 4, se procede a realizar el correspondiente análisis de las muestras proporcionadas estimando los posibles errores cometidos durante el proceso, para comprobar estadísticamente que la muestra no cuente con datos erróneos muy considerables y sea más confiable.

Este proceso se lo observa con detalle en el Anexo 2, donde se podrá observar las tablas con este análisis detallado y la metodología recomendada a seguir, pudiendo corroborar que las muestras no cuentan con datos con errores considerables.

5.1. CALIBRACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO CARACTERÍSTICO DEL EMISOR

Se realizó la calibración de estos emisores de riego, debido a que no se cuenta con la información respectiva que caracteriza el funcionamiento hidráulico de estos. Para dicha calibración de estos emisores y obtener el coeficiente de variación de fabricación, Pizarro Cabello (1996) recomienda que se utilice un mínimo de 25 emisores, midiendo el caudal que arrojan a la presión nominal, sin embargo; no se cuenta con la información de la presión nominal para este estudio, por lo que se realizaron distintas mediciones variando la presión desde 0,6 bares hasta 2,5 bares, para así ajustar la curva de descarga de los goteros a una expresión matemática mediante el uso del software Microsoft Excel.



Figura 30: Esquema armado para la calibración y mediciones

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9: Tabla de registros de caudales [lts/h]

Presión [Bar]	2,3	2,5	2,1	1,8	1,3	1	0,6	1,6
Nro.								
1	2,33	2,20	2,29	2,40	2,35	2,39	2,35	2,41
2	2,39	2,35	2,32	2,40	2,40	2,37	2,40	2,41
3	2,35	2,44	2,45	2,47	2,41	2,36	2,39	2,42
4	2,42	2,43	2,31	2,32	2,34	2,37	2,39	2,39
5	2,35	2,41	2,31	2,43	2,47	2,35	2,40	2,40
6	2,48	2,41	2,28	2,29	2,34	2,41	2,38	2,36
7	2,40	2,43	2,40	2,43	2,38	2,42	2,37	2,50
8	2,30	2,37	2,45	2,45	2,51	2,36	2,38	2,38
9	2,43	2,36	2,27	2,28	2,31	2,33	2,37	2,36
10	2,43	2,42	2,35	2,33	2,33	2,41	2,36	2,35
11	2,41	2,39	2,34	2,30	2,31	2,35	2,38	2,35

12	2,41	2,39	2,37	2,38	2,39	2,43	2,37	2,37
13	2,32	2,37	2,85	2,46	2,80	2,43	2,42	2,38
14	2,42	2,39	2,37	2,39	2,40	2,42	2,41	2,39
15	2,32	2,36	2,51	2,44	2,40	2,40	2,42	2,43
16	2,41	2,44	2,44	2,47	2,39	2,40	2,40	2,42
17	2,41	2,53	2,46	2,46	2,36	2,41	2,34	2,43
18	2,50	2,49	2,46	2,49	2,35	2,44	2,42	2,41
19	2,45	2,41	2,45	2,44	2,38	2,39	2,40	2,43
20	2,41	2,42	2,43	2,47	2,39	2,41	2,42	2,42
21	2,38	2,46	2,43	2,42	2,32	2,38	2,39	2,35
22	2,45	2,37	2,30	2,27	2,40	2,37	2,36	2,42
23	2,36	2,42	2,42	2,46	2,35	2,43	2,39	2,37
24	2,41	2,44	2,36	2,31	2,37	2,40	2,40	2,36
25	2,46	2,40	2,40	2,36	2,39	2,38	2,38	2,34
26	2,33	2,20	2,29	2,40	2,35	2,39	2,35	2,41
PROMEDIO	2.398	2.397	2.397	2.395	2.393	2.390	2.388	2.393

Fuente: Elaboración propia

De la anterior tabla de caudales medidos a distintas presiones, se pudo obtener la curva de descarga del emisor de marca NETAFIM, lo cual en la figura 30 se la puede apreciar de manera clara:

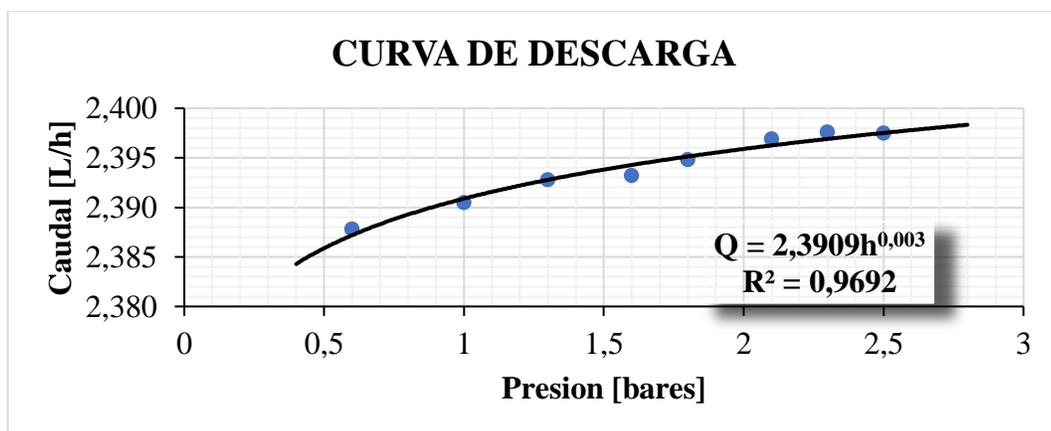


Figura 31: Curva de descarga del gotero

Fuente: Elaboración propia

Mediante un proceso de regresión a través del software Microsoft Excel, se obtuvo la ecuación característica del emisor (2) con un Coeficiente de correlación de $R^2 = 0,9692$, esto demuestra que existe un grado de asociación elevado entre los distintos emisores y que el restante se debe tal vez a errores realizados durante las mediciones. Con lo que se obtuvo los siguientes valores:

$$Q = 2,3909 * h^{0,003} \quad (9)$$

Donde;

K= Coeficiente de descarga del emisor que le caracteriza ($K = 2,3909$).

x = exponentes de descarga que depende del régimen de flujo dentro del emisor ($x = 0,003$).

Cálculo del Coeficiente de Variación experimental

A continuación, se determina el coeficiente de variación experimental para las diferentes presiones ya establecidas durante las mediciones de los caudales de los 26 emisores, para ello se utilizaron las siguientes expresiones matemáticas:

$$CV = \frac{\delta}{q_a} \quad (10)$$

Donde;

CV = Coeficiente de variación experimental

δ = Desviación típica

q_a = Caudal medio de los 26 emisores en estudio

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - q_a)^2}{n}} \quad (11)$$

q_i = Caudal del emisor

n = Número de emisores de estudio

$$q_a = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n} \quad (12)$$

En la siguiente tabla se puede observar los valores del caudal medio, desviación típica y los coeficientes de variación de los 26 emisores a diferentes presiones de trabajo:

Tabla 10: Tabla de coeficientes de variación

Presión [Bar]	2,3	2,5	2,1	1,8	1,3	1	0,6	1,6
Promedio [lts/h]	2,40	2,40	2,40	2,39	2,39	2,39	2,39	2,39
Desviación [lts/h]	0,0508	0,0675	0,1150	0,0686	0,0939	0,0290	0,0215	0,0360
CV =	2,12%	2,81%	4,80%	2,87%	3,92%	1,21%	0,90%	1,51%

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que existe diferencia entre los distintos coeficientes de variación, sin embargo se observa que en las distintas situaciones el coeficiente es menor al 4 %, obteniendo como representación de la muestra un valor de 2,52 %, lo que implica que estos emisores se encuentra en una clasificación excelente, según (Gil Marín et al. 2002).

5.2. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD (CU)

Una vez realizada la calibración de los emisores y el análisis de las muestras recolectadas en campo, se procede a obtener los caudales medios, donde se los denota en las siguientes tablas:

Tabla 11: Tabla de referencia de los caudales promedios

	Lateral I	Lateral II	Lateral III	Lateral IV
1er. Emisor	E1	E5	E9	E13
2do. Emisor	E2	E6	E10	E14
3er. Emisor	E3	E7	E11	E15
4to. Emisor	E4	E8	E12	E16

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12: Caudales promedios [lts/h]

	Lateral I	Lateral II	Lateral III	Lateral IV
1er. Emisor	2,19	2,28	2,32	2,33
2do. Emisor	2,3	2,24	2,27	2,25
3er. Emisor	2,27	2,3	2,33	2,15

4to. Emisor	2,24	2,39	2,35	2,23
--------------------	-------------	------	------	-------------

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo del coeficiente de uniformidad de caudales, se utilizó ecuación (3), sin embargo, antes se tuvieron que calcular algunos datos indirectos, tales como:

Para el cálculo del caudal medio emitido por los 16 emisores se utilizó la ecuación (12):

$$q_a = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n} = 2,28 \text{ lts/h}$$

Donde;

q_a = Caudal medio de los 16 emisores analizados en la subunidad [lts/h].

q_i = Caudal del emisor [lts/h].

n = Número de emisores analizados.

El caudal medio de los emisores que constituyen el 25% de más bajo caudal, ecuación (12):

$$q_{25} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n} = \frac{2,19 + 2,24 + 2,23 + 2,15}{4} = 2,20 \text{ lts/h}$$

Por consiguiente, el coeficiente de uniformidad con la ecuación (6):

$$CUD = \frac{q_{25}}{q_a} = \frac{2,20}{2,28} = 0,9649 = 96,49\%$$

Donde;

CUD = Coeficiente de uniformidad de distribución de caudales

q_{25} = Caudal de los emisores que constituyen el 25% de más bajo caudal

q_a = Caudal medio de todos los emisores

Se obtuvo un coeficiente de uniformidad de distribución de caudales igual a 96,49 %, lo que refleja una buena distribución del agua; por lo tanto, existe una buena funcionalidad de los goteros, siendo este parámetro mayor al 88 % establecido por Williams Chavarría (2011). Y comparándolo con otros estudios realizados tales como, el “Análisis de la uniformidad del riego en cultivos de fresa” realizado por Bohórquez Caro, Gavilán Zafra y Contreras Zafra (2015); que en sus resultados obtuvieron diferentes valores de CUD, la mayoría de ellos superiores al 90%; sin embargo, se puede apreciar un promedio de 95,2%

como valor representativo a dicho estudio; muy semejante al valor obtenido en esta investigación.

Para el cálculo del coeficiente de uniformidad de presiones, se utilizó la ecuación (8), sin embargo, antes se tuvieron que calcular algunos datos indirectos, tales como:

La presión media emitida por cada uno de los 16 emisores en estudio:

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} = 12,06 \text{ m. c. a.} \quad (13)$$

Donde;

P_m = Presión media de los 16 emisores analizados en la subunidad [m.c.a.].

q_i = Presión del emisor [bar].

n = Número de emisores analizados.

Utilizando también la ecuación (13), la presión media de los emisores que constituyen el 25% de más baja presión:

$$P_{25} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} = \frac{8,69 + 9,19 + 9,07 + 6,37}{4} = 8,33 \text{ m. c. a.}$$

Por consiguiente, mediante la ecuación (8), el coeficiente de uniformidad de presiones es:

$$CUDP = \left(\frac{P_{25}}{P_m} \right)^x = \left(\frac{8,33}{12,06} \right)^{0,003} = 0,9989 = 99,89 \%$$

Donde;

CUDP= Coeficiente de uniformidad de distribución de presiones.

P₂₅= Media de las presiones medidas en los emisores que representan la cuarta parte de más baja presión.

P_m= Media de las presiones medidas en todos los emisores.

x= Exponente de descarga característico del emisor obtenido de la curva de descarga del emisor (x= 0,003).

Se obtuvo un coeficiente de uniformidad de distribución de presiones igual a 99,89 %; sin embargo, cabe recalcar que en el terreno no se ve reflejado esta situación, ya que existen variaciones notables de presión entre los primeros y últimos emisores de más de 1 bar de diferencia, lo que no lleva a destacar la gran influencia del tipo de emisor, siendo el mismo

autocompensante, muy influyente en el funcionamiento de los mismos. Y teóricamente el CUDP se acerca al 100 % debido al bajo valor del exponente de descarga.

5.4. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LA SUBUNIDAD

El autor Pizarro Cabello (1996), dice que la baja uniformidad de los emisores se deben a la afección de la presión de funcionamiento de los emisores, ya sea un diseño inadecuado, falta de reguladores de presión o desajuste de los mismos, obturaciones o a un inadecuado coeficiente de variación de fabricación. Para tales efectos de estas causas, se propone calcular los tres coeficientes de variación siguientes:

- a) Coeficiente de variación total de caudales, para lo cual antes se debe calcular el caudal medio de los 16 emisores, más su desviación típica mediante la ecuación (11).

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - q_a)^2}{n}} = 0,06 \text{ lts/h}$$

δ = Desviación Típica

q_a = Caudal medio de los 16 emisores en estudio

q_i = Caudal del emisor

n = Número de emisores de estudio

$$CV_t = \frac{\delta}{q_a} = \frac{0,06}{2,28} = 0,0269 = 2,69 \%$$

Donde;

CV_t = Coeficiente de variación total

Se obtuvo un coeficiente de variación total de 2,69 %, lo que según el autor Pizarro Cabello (1996) manifiesta que los emisores se encuentran en un funcionamiento excelente siendo este valor menor al 10 %.

- b) Coeficiente de variación de caudales debido a causas hidráulicas, para lo cual antes se debe calcular la presión media en los 16 emisores, más su desviación típica.

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2}{n}} = 2,89 \text{ m. c. a.} \quad (14)$$

δ = Desviación Típica

P_m = Presión media de los 16 emisores en estudio ($P_m = 12,06$ m.c.a.)

P_i = Presión del emisor

n = Número de emisores de estudio

$$CV_h = \frac{\bar{p}}{P_m} = \frac{2,89}{12,06} = 0,2396 = 23,96 \% \quad (15)$$

CV_h = Coeficiente de variación de caudales por causas hidráulicas.

El coeficiente de variación de caudales debido a causas hidráulicas es de 23,96 %, por lo que se puede deducir que es mayor, justamente a las diferencias de energía en las tuberías laterales, ya sea por las características topográficas en la subunidad o la fricción del flujo en las tuberías.

c) Coeficiente de variación de caudales debido a la baja uniformidad de los emisores.

$$CV_e = \sqrt{CV_t^2 - x^2 * CV_h^2} \quad (16)$$

$$CV_e = \sqrt{0,0269^2 - 0,003^2 * 0,2396^2} = 0,0269 = 2,69 \%$$

Donde;

CV_e = Coeficiente de Variación debido a la baja uniformidad de los emisores.

x = Exponente de descarga característico de los goteros, obtenida de la curva de descarga del emisor ($x = 0,003$).

Se obtuvo un coeficiente de variación de caudales de 2,69 %, siendo menor al 20 % que establece el autor Pizarro Cabello (1996), donde se puede apreciar que existe una buena uniformidad de los caudales. Se puede observar una relación de resultados junto al CUD, debido a que el sistema de la subunidad mantiene una buena uniformidad de caudales y poca variabilidad observando el cv.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

De la calibración realizada con el grupo de 26 emisores como lo recomienda el autor Pizarro Cabello (1996), se ajustaron estos datos a una expresión matemática de tipo exponencial, donde los resultados son; el exponente de descarga igual a 0,003 que confirma el uso de un emisor autocompensante utilizado en el sistema e incluso se puede observar una similitud entre curvas de las figuras 7 y 31, lo cual demuestra que este emisor utilizado es de buena calidad siendo el mejor del grupo de emisores existentes, y es el más recomendable para usarlo en terrenos con pendientes elevadas; también se obtuvo un coeficiente de descarga de 2,39 que refleja el caudal nominal del gotero.

Durante el análisis de la muestra de los 26 emisores de calibración, se obtuvo también el coeficiente de variación de fabricación del emisor de 2,52 %, cumpliendo así una de las condiciones exigibles para su selección durante el diseño, lo que refleja una excelente calidad de emisor estudiado, perteneciendo a una categoría A, ya que tiene un valor menor al 5% como lo establece el autor Pizarro Cabello (1996).

Finalmente, de acuerdo a la metodología aplicada de Merriam y Keller (1978), siguiendo el procedimiento correspondiente se obtuvo un coeficiente de uniformidad de distribución de caudales de 96,49%, donde se observa un valor muy bueno que denota que existe una buena uniformidad en la subunidad estudiada, a pesar de la topografía del sitio (reflejado en el coeficiente de variación de caudales por causas hidráulicas del 23,96%); y en comparación con otros estudios realizados tales como; el “Análisis de la uniformidad del riego en cultivos de fresa” realizado por Bohórquez Caro, Gavilán Zafra y Contreras Zafra (2015); que en sus resultados obtuvieron diferentes valores de CUD, donde la mayoría de ellos fueron superiores al 90%; sin embargo, se puede apreciar un promedio de 95,2% como valor representativo a dicho estudio, semejante al valor obtenido en esta investigación; por lo que se acepta este valor, donde se puede ver cuán importante es la selección del emisor, ya sea en su tipo o calidad, para el diseño de un sistema de riego.

Esta metodología de Merriam y Keller (1978) es muy práctica, se la puede emplear para cualquier sistema del valle central de Tarija para poder tener un mayor control sobre el uso y manejo del agua; comprobar si realmente existe los beneficios establecidos durante el periodo de diseño del sistema; controlar la dosis necesaria de agua para el cultivo, si es excedente o existe falta de agua e incluso el control de productos de fertirrigación utilizados para su desarrollo.

6.2. RECOMENDACIONES

- Durante la selección de la subunidad es recomendable escoger un espacio neutro, capaz de representar a la parcela para complementar el estudio con una evaluación completa del sistema a cada uno de los elementos que lo conforman, y poder aplicar una metodología de evaluación adecuada a todo el sistema y finalmente así, estimar cuan eficiente es su funcionamiento.
- Se recomienda la contratación de personal técnico, capaz de poder operar el sistema de manera adecuada, que pueda identificar las fallas de manera oportuna, ya sea en los equipos o en la red de distribución, realizar el mantenimiento de cada uno de estos, cumplir con los horarios de riego ya establecidos en el diseño, entre otras funciones.
- Antes de la realización de mediciones en campo, donde existieron diferentes problemas para la toma de datos, se recomienda desde un principio solucionarlos de manera definitiva; como ser la eliminación de una lateral (por motivos de complementación de un modelo distinto de emisor), el lavado de los filtros (utilización de químicos de limpieza como ser, los ácidos, cloros u otros), lavado de laterales antes de realizar las mediciones, e incluso la curación de fugas de agua (en uniones o accesorios y en roturas). Esto para obtener una buena muestra de datos y asemejar nuestros resultados a un valor lo más real posible en las condiciones rutinarias de trabajo del sistema.
- Se recomienda construir un sedimentador a la salida de la fuente de agua para mejorar su calidad, debido a que se pudo observar bastante presencia de turbidez en el agua al llegar a los emisores; y así disminuir obturaciones en los emisores y evitar una afección en la variación de los caudales de los emisores en el sistema.

- Es necesario el uso de manómetros al ingreso de las subunidades para tener control del caudal de funcionamiento de los emisores y obtener una respuesta oportuna sobre el funcionamiento del mismo.
- Mejorar la instalación de los emisores o laterales, debido a que estos se encuentran sobre la superficie, corriendo riesgo de que estos se deterioren u obturen con partículas sueltas de la superficie del cultivo e incluso la intrusión de raíces, y para una mayor facilidad cuando se quiera realizar algunas mediciones; instalar elementos o accesorios de control para futuras evaluaciones en las subunidades de las demás instalaciones.
- Es pertinente realizar el control del coeficiente de uniformidad de manera periódica, para ver los cambios que sufren los emisores al pasar el tiempo o aplicar alguna metodología de mantenimiento por si se encuentran obturados e incluso ya desecharlos si existen elementos en mal estado.
- De acuerdo al estudio realizado, se recomienda continuar con el análisis de los demás componentes del sistema para establecer el desempeño en el que se encuentran, y determinar el cambio radical que sufre la parcela al usar este método de riego en comparación con los tradicionales.
- Se recomienda instalar un sistema de calibración de emisores en la parcela para tener la certeza sobre en qué estado se encuentran estos.
- Es importante que los agricultores que utilizan sistemas de riego tecnificados realicen evaluaciones periódicas de la uniformidad de riego. Para evitar impactos negativos en la productividad de sus cultivos, es necesario capacitar y difundir la metodología utilizada. Este estudio destaca la importancia de los emisores en las instalaciones, ya que tienen un impacto significativo en el ahorro de agua, el consumo de energía y combustible, así como en el incremento de la rentabilidad al reducir los costos de operación y mejorar la eficiencia en la distribución del agua.