



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, septiembre 20 de 2018

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

Los suscritos:

Pablo Cesar Yossa Manrique, con C.C. No. 1081157057, Luis Felipe Yossa Osorio, con C.C. No. 1081158917, autores de la tesis y/o trabajo de grado titulado: Efectos de la pendiente en el Coeficiente de Uniformidad y pérdidas localizadas en un lateral de riego por goteo presentado y aprobado en el año 2018 como requisito para optar al título de Ingeniero Agrícola;

Autorizamos al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, pasados dos años a partir de la fecha, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Pablo Cesar Yossa M.
Pablo Cesar Yossa Manrique

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Luis Felipe Yossa Osorio
Luis Felipe Yossa Osorio

Vigilada Mineducación

Neiva, septiembre 20 de 2018

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

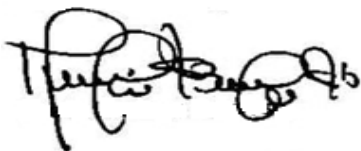
Ciudad

Cordial saludo

El suscrito Marlio Bedoya Cardoso docente de planta de la facultad de ingeniería, en calidad de Director del trabajo de grado “Efectos de la pendiente en el Coeficiente de Uniformidad y pérdidas localizadas en un lateral de riego por goteo”, manifiesto que dicho trabajo es de carácter confidencial con un tiempo de restricción de dos años, para que la biblioteca conserve el trabajo y aplique las medidas tecnológicas necesarias para impedir el acceso a los contenidos a quienes no estén legalmente facultados para hacerlo.

Agradezco su atención.

Director Trabajo de grado:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Marlio Bedoya Cardoso', written in a cursive style.

Marlio Bedoya Cardoso

**EFFECTOS DE LA PENDIENTE EN EL COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Y
PÉRDIDAS LOCALIZADAS EN UN LATERAL DE RIEGO POR GOTEO**

PABLO CESAR YOSSA MANRIQUE

LUIS FELIPE YOSSA OSORIO

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA AGRÍCOLA
NEIVA – HUILA
2018**

**EFFECTOS DE LA PENDIENTE EN EL COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Y
PÉRDIDAS LOCALIZADAS EN UN LATERAL DE RIEGO POR GOTEIO**

PABLO CESAR YOSSA MANRIQUE

LUIS FELIPE YOSSA OSORIO

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Agrícola**

**Director
MARLIO BEDOYA CARDOSO
Doctorado en Ciencias en Economía Agrícola**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA AGRÍCOLA
NEIVA – HUILA
2018**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Neiva, septiembre del 2018.

Dedicatoria

Hace muchos años, en alguna de las montañas de este país un joven muchacho sobre el lomo de una mula, con lágrimas en los ojos le suplicaba a su humilde padre que lo dejara quedarse en la finca en lugar de obligarlo a estudiar en la ciudad, a lo que su padre con mucho valor sabiamente le respondió “No llore mijo, algún día me lo va a agradecer”, mientras que el muchacho inmediatamente le responde “¿Usted cómo va a saber eso?”...

A Dios como el ser supremo que me dio la vida, la salud y el valor de llegar a donde estoy.

A Don Pablo Yossa y Doña Gloria Manrique; los mejores padres que pude haber tenido a quienes les debo lo que soy y lo que tengo, por su amor, su ejemplo, su apoyo incondicional, su intachable educación y sobre todo por su gran esfuerzo para cuidar de mí durante toda mi vida.

A mis hermanos, Liliana, Hugo, Edna y Nini, quienes son dignos de todo mi amor, respeto y admiración, por su apoyo incondicional.

A mis sobrinos Nicolás, Santiago, Martín y el que viene en camino, por ser el motor que me impulsa a trabajar para dejarles un mundo mejor.

A mi abuela Chiqui por su amor y protección, quien ha estado al pendiente de mí durante gran parte de mi vida.

A Deify, quien ha sido mi compañera y gran apoyo en todos mis proyectos durante los últimos años.

A mis amigos de universidad, Nicole, Melany, Hector, Sergio, Andrés, Angélica, Julián, Sebastián, Giovanni, Tatiana, Gustavo, en fin, a todos aquellos que hicieron parte de mi formación, de quienes sin duda aprendí muchas cosas que aportaron bastante en mi vida.

A mis demás familiares, amigos y todas aquellas personas que en algún momento me apoyaron para hacer de este sueño realidad.

Por último y desde luego no menos importante quiero hacerle un justo reconocimiento muy especial, a mi primo, a mi amigo, a mi compañero no solo de tesis sino de innumerables momentos en mi vida, a mi futuro colega Luis Felipe Yossa Osorio, quien ha sido un apoyo incondicional durante todo el desarrollo de esta carrera, de quien mucho he aprendido y quien merece mi más sincero agradecimiento.

... ¡Gracias papá, gracias mamá!

Pablo Cesar Yossa Manrique

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado:

A Dios por llenarme de bendiciones cada día... por darme la sabiduría, el entendimiento y la fortaleza necesaria para enfrentar los retos de la vida...

A mis padres por tener tanta paciencia, por enseñarme con amor y mucho pero mucho esfuerzo y dedicación los valores y todo lo necesario para convertirme en lo que soy...

A mi madre Nury Osorio Gómez, por ser ese ángel de la guarda, quien con amor y sus consejos me ha apoyado en cada decisión importante a lo largo de mi vida...

A mi padre Javier Yossa Esquivel, quien por su carácter me forjó como una persona de bien... Gracias por darme ese ejemplo de valor, humildad, sacrificio y entrega para cumplir mis sueños...

A mi hermano Juan Sebastian Yossa Osorio, por ser la motivación que me impulsa a ser una mejor persona y poder brindarle un gran ejemplo... Gracias por ser el confidente y compañero de travesuras que cualquier hermano quisiera tener...

A mis abuelas Chiquinquirá y Lucinda, gracias por sus oraciones, por su gran amor y fe en mí...

A mi familia por ser siempre el motor que me impulsa a ser mejor cada día y sin duda alguna por ser ese apoyo fundamental en cada paso de mi vida...

A mis amigos de la U, que sin duda alguna me ayudaron a crecer como persona con sus cualidades y conocimientos... ¡Ustedes dejaron una huella en mi corazón!

A Pablo César Yossa Manrique, quien fue mi compañero en esta gran aventura... Gracias por ser ese hermano mayor y brindarme ese ejemplo de disciplina, carácter y entrega para superar cada reto... Por todas esas anécdotas y experiencias de las cuales sin duda quedaron muy buenas enseñanzas... Y pensar que éste presente fue un futuro que considerábamos muy lejano... ¡Mil y mil gracias!

¡A todos... Infinitas gracias por creer en mí!

Luis Felipe Yossa Osorio

Agradecimientos

Primero que todo queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos al director del presente trabajo de grado el Dr. Marlio Bedoya Cardoso, por los valiosos conocimientos aportados y su apoyo incondicional durante el desarrollo de esta investigación.

Al profesor John Jairo Arévalo Hernández y los monitores del laboratorio de suelos por su colaboración con el préstamo del laboratorio para el desarrollo de este estudio.

A los jurados de este proyecto de grado por sus amables y pertinentes recomendaciones para el éxito de la investigación.

A los monitores de los diferentes laboratorios que facilitaron los instrumentos de medida para la recolección de los datos del presente estudio.

A los docentes y administrativos de la universidad Surcolombiana, quienes aportaron grandes conocimientos y herramientas en nuestra formación profesional que hicieron posible llevar a cabo con éxito este trabajo de grado.

A la universidad Surcolombiana, más exactamente a la facultad de ingeniería quien nos abrió las puertas para poder acceder a una educación superior de calidad.

Índice general

1.	Introducción	1
2.	Marco conceptual.....	3
2.1	Pérdidas por fricción	3
2.2	Coeficiente de Uniformidad (CU)	6
2.3	Fundamentación matemática para el cálculo de pérdidas de presión.	9
3.	Materiales y métodos	14
3.1	Localización.....	15
3.2	Muestras de goteros	15
3.3	Metodología	15
3.3.1	Disposición del sistema y toma de datos	17
3.3.2	Coeficiente de Variación (CV)	18
3.3.3	Curva Presión – caudal	18
3.3.4	Relación de áreas	20
3.3.5	Coeficiente de Uniformidad (CU), pérdidas por fricción (hf), localizadas y pérdidas totales	21
3.3.6	Análisis estadístico.....	25
4.	Resultados y discusión.....	26
4.1	Relación presión – caudal	26
4.2	Coeficiente de Variación.....	27
4.3	Comparación de los caudales de descarga entre pendientes de los tres tipos de gotero	29
4.4	Comparación del caudal del gotero entre diámetros y pendientes.....	31
4.5	Comparación del caudal de los goteros b y c en tubería de 16 mm de diámetro entre pendientes	33
4.6	Coeficiente de Uniformidad (CU)	34

4.7 Pérdidas por fricción, localizadas y totales	40
5. Conclusiones	53
6. Referencias	55
ANEXOS	59

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Clasificaciones de uniformidad del sistema de microirrigación.</i>	8
Tabla 2. Valores del factor M que depende del diámetro.	10
Tabla 3. Clasificación del flujo según número de Reynolds.	11
Tabla 4. Coeficientes C para ecuación de Hazen – Williams.	13
Tabla 5. Especificaciones de los goteros empleados en el estudio.	14
Tabla 6. Diseño del experimento.	25
Tabla 7. Coeficiente de Variación promedio de los diferentes tipos de gotero.	28
Tabla 8. Clasificación de goteros según CV propuesta por Keller y Bliesner (1990).	28
Tabla 9. Clasificación de goteros según CV, norma mexicana NMX-O-082-SCFI-2001.	28
Tabla 10. Comparación de caudales de los tres tipos de gotero entre pendientes para cada diámetro de tubería.	29
Tabla 11. Asignación de código a metodologías para el cálculo de pérdidas por fricción.	40
Tabla 12. Relación de pérdidas por fricción, según diferentes metodologías, en pendiente de 0%.	41
Tabla 13. Relación de pérdidas por fricción según diferentes metodologías para pendiente de 3%.	42
Tabla 14. Relación de pérdidas por fricción según diferentes metodologías, en pendiente de -1%.	43
Tabla 15. Relación de pérdidas por fricción según diferentes metodologías para pendiente de -3%.	44
Tabla 16. Factor multiplicador de pérdidas localizadas según diferentes metodologías.	45
Tabla 17. Asignación de código a metodologías para el cálculo de pérdidas localizadas.	46
Tabla 18. Relación de pérdidas totales, según diferentes metodologías, en pendiente de 0%....	47
Tabla 19. Relación de pérdidas totales según diferentes metodologías para pendiente de 3%....	48
Tabla 20. Relación de pérdidas totales, según diferentes metodologías, en pendiente de -1%. ..	49
Tabla 21. Relación de pérdidas totales, según diferentes metodologías para pendiente de -3%. 51	51

Índice de ANEXOS

ANEXO 1. Tablas de cálculos para el diseño del lateral de goteo de 16mm con cada tipo de gotero.	59
ANEXO 2. Tabla de ecuación característica determinada experimentalmente para cada tipo de gotero.	60
ANEXO 3. Tabla de ANOVA (simple) para caudal de cada tipo de gotero en los dos diámetros por pendiente.....	61
ANEXO 4. Tabla de ANOVA (multifactorial) para caudal de cada tipo de gotero.....	62
ANEXO 5. Tabla de ANOVA (simple) para presión por tipo de gotero – 16mm en cada pendiente.	63
ANEXO 6. Tabla de ANOVA (simple) para presión por tipo de gotero – 12mm en cada pendiente.	64
ANEXO 7. Tabla ANOVA (simple) para CU Christiansen (1942) de cada tipo de gotero en los dos diámetros por pendiente.	65
ANEXO 8. Tabla ANOVA (multifactorial) para CU Christiansen (1942).....	66
ANEXO 9. Tabla ANOVA (simple) para CU Keller y Karmeli (1975) de cada tipo de gotero en los dos diámetros por pendiente.....	67
ANEXO 10. Tabla ANOVA (multifactorial) para CU Keller y Karmeli (1975).	68
ANEXO 11. Tabla ANOVA (simple) para CU Merriam y Keller (1978) de cada tipo de gotero en los dos diámetros por pendiente.....	69
ANEXO 12. Tabla ANOVA (multifactorial) para CU Merriam y Keller (1978).....	70
ANEXO 13. Tabla ANOVA (simple) para CU Barragán (2005) de cada tipo de gotero en los dos diámetros por pendiente.....	71
ANEXO 14. Tabla ANOVA (multifactorial) para CU Barragán (2005).....	72
ANEXO 15. Dimensiones de los tipos de gotero.	73
ANEXO 16. Relación de áreas del sistema tubería – gotero empleados en el estudio.	74
ANEXO 17. Tabla de comportamiento del CU evaluado con diferentes metodologías para cada uno de los tratamientos.	77

Resumen

En la agricultura, los sistemas de riego bien diseñados posibilitan el uso óptimo de los recursos, permitiendo dimensionar la disposición y el tamaño de cada componente del sistema, con el fin de proporcionar el agua a las plantas en el momento oportuno, teniendo en cuenta aspectos edáficos, climáticos y vegetativos bajo ciertas condiciones de energía, economía y mano de obra, permitiendo mejorar los rendimientos de la producción. Por esta razón, es indispensable estimar de manera adecuada las diferentes pérdidas de presión que se presentan en las partes que conforman un sistema de riego, debido al rozamiento del fluido con las paredes de la tubería y el efecto que causa la parte insertada de un emisor en un lateral de riego por goteo.

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en las instalaciones de la facultad de Ingeniería de la Universidad Surcolombiana en la ciudad de Neiva en el Departamento del Huila, para determinar el efecto que tiene la pendiente sobre el Coeficiente de Uniformidad, las pérdidas por fricción y localizadas, en laterales de riego por goteo de 10 metros (m) de longitud, con tres tipos de goteros que se comercializan en la zona, en diámetros exteriores de tubería de 12 mm y 16 mm y en pendientes de 3%, 0%, -1% y -3%.

Los laterales se evaluaron con goteros de 2 l/h espaciados cada 0.20 metros. Los datos técnicos de los emisores se evaluaron teniendo en cuenta la norma mexicana NMX-O-082-SCFI-2001, determinando que 2 de los tres emisores empleados son autocompensados.

Para evaluar el desempeño de los laterales, cuatro metodologías fueron empleadas para determinar el Coeficiente de Uniformidad (CU); estas fueron: la propuesta por Christiansen (1942), Keller y Karmeli (1974), Keller y Karmeli (1975) y finalmente Barragán, Bralts y Wu (2005). Las metodologías que arrojaron los resultados más altos del Coeficiente de Uniformidad (CU) en todos los laterales fueron las propuestas por Christiansen (1942) y Keller y Karmeli (1974).

Las pérdidas por fricción se evaluaron con las ecuaciones de Hazen-William y Darcy-Weisbach, para establecer cuál de ellas es la más ajustada a los datos experimentales. Con la expresión de Darcy-Weisbach se emplearon diferentes ecuaciones de factores de fricción (f). Las pérdidas por conexión o localizadas se obtuvieron como la diferencia entre las presiones registradas experimentalmente a un tercio ($1/3$), dos tercios ($2/3$) y al final del lateral, menos las pérdidas por fricción. Para el cálculo de las pérdidas localizadas se emplearon las expresiones propuestas por: Keller y Bliessner (1990), Pizarro (1996), Bagarello et al (1997), Bedoya y Angeles (2017) y finalmente una ecuación propuesta en este trabajo.

La metodología de pérdidas por fricción que describe de manera más aproximada las pérdidas experimentales fue la propuesta por Darcy - Weisbach con factor de fricción f de Blasius. Por otra parte, las pérdidas localizadas se ajustaron mejor a la metodología propuesta por Bedoya y Ángeles (2017) solamente en la pendiente de 0% (a nivel); en cuanto a la pendiente de 3% Pizarro (1996) fue quien se destacó y en las pendientes negativas Bagarello et. Al (1997) fue quien presentó los mejores ajustes. Finalmente, se comprobó que cuando en un lateral de riego la relación área del sistema tubo-gotero aumenta, se producen mayores pérdidas localizadas.

1. Introducción

En la agricultura, el riego desempeña un papel fundamental que contribuye en el cumplimiento de los requerimientos alimentarios básicos de los seres humanos. Sin embargo, el progresivo incremento de la población mundial aumentará la demanda de alimentos mientras que el suministro de los mismos se verá afectado por factores como la limitación de los recursos naturales, la escasez de tierras productivas y el cambio climático, lo que supone un reto para una producción a precios asequibles.

Se estima que para proporcionar alimento a una población de más de 9 000 millones de personas en el año 2050, será necesario aumentar la producción agrícola mundial en un 70 % y en los países en vía de desarrollo hasta en un 100 %, lo que conlleva a un crecimiento en la demanda del recurso hídrico para fines de regadío (FAO, 2011); por esta razón, como lo afirma Hall (1999), es evidente que se debe dar prioridad a la investigación relacionada con la irrigación, ya que la innovación y el perfeccionamiento de los actuales sistemas incrementan la producción agrícola y permiten garantizar un manejo racional del agua.

La sobreexplotación del recurso hídrico por el manejo inadecuado e incontrolado tanto de las aguas superficiales como subterráneas han disminuido considerablemente la disponibilidad de agua potable y de riego en algunas zonas del mundo lo que sin duda se ve inmediatamente reflejado en la productividad de los cultivos afectando la economía campesina y poniendo en riesgo la seguridad alimentaria de la población.

Colombia es un país con gran vocación agropecuaria por su estratégica ubicación en el globo terráqueo; sus suelos, su topografía, su clima, etc. hacen del territorio un lugar ideal para cultivar durante todo el año, no obstante, aún se cuenta con una agricultura convencional en gran parte del territorio a pesar de los avances tecnológicos, tanto así, que todavía son frecuentes los cultivos en secano o con sistemas de riego deficientes generando como resultado sistemas poco competitivos en un mundo cada vez más globalizado.

En este orden de ideas, los sistemas de riego bien diseñados son la mejor alternativa para un uso racional del agua posibilitando una producción de calidad y sostenible con buenos rendimientos en los cultivos, tanto a nivel de pequeños como de grandes productores. Así mismo, la variabilidad climática, hace que estos sistemas sean una necesidad para poder producir y ser competitivo. Por lo tanto, para el diseño de dichos sistemas se requiere de un amplio conocimiento en hidráulica, suelos, fisiología vegetal, climatología entre otros, para un diseño acertado.

Pizarro (1996) asegura que los riegos localizados de alta frecuencia RLAF (Goteo, Microaspersión y Exudación) cobran cada vez una mayor importancia a nivel mundial en donde la implementación de éstos ha incrementado considerablemente durante los últimos años, sobre todo en países como Estados Unidos, España, Australia, Sudáfrica, Israel, entre otros; en las zonas donde se instalan dichos sistemas se ocasiona inmediatamente una gran revolución agrícola, no solo por sus ventajas y desventajas respecto a otros métodos de riego como gravedad y aspersión sino que han cambiado la forma de cultivar aun en terrenos arenosos, poco profundos con

topografías agrestes donde cultivar en secano es bastante complejo e impredecible, incrementando de esta manera el valor de dichos predios.

En sistemas de riego localizado de alta frecuencia, el sistema de riego por goteo es catalogado como el más eficiente en la entrega del agua (Bedoya y Ángeles, 2017), por lo que numerosos investigadores han dedicado importantes esfuerzos en el desarrollo y mejoramiento de metodologías que permitan estimar cada vez de una manera más precisa las pérdidas por fricción y localizadas debido a la inserción de emisores en las tuberías (laterales). Sin embargo, algunos diseñadores les dan poca importancia a las pérdidas localizadas ocasionando inconvenientes en los sistemas, pues se ha demostrado que dichas pérdidas son muy relevantes a la hora de realizar los cálculos de tubería (Demir, Yurdem, y Degirmencioglu, 2007).

En la actualidad no se conoce la relación que existe entre la pendiente de un lateral de riego, y la forma como se conectan los emisores sobre el Coeficiente de Uniformidad (CU). Por lo tanto, el presente trabajo pretende establecer dichas relaciones con un nivel de significancia del 95% en laterales de riego por goteo.

2. Marco conceptual

Bonifacio (2014), define el riego como el suministro artificial de agua al suelo para suplir la humedad que requieren las plantas de un cultivo, llevándose a cabo una aplicación uniforme y oportuna del recurso hídrico a un perfil de suelo para reponer el agua aprovechada por dicho cultivo entre dos riegos sucesivos. Por lo anterior, existen diversos métodos de riego como el riego por superficie, riego por aspersión y el riego localizado, que permiten aplicar el agua al suelo de diferentes maneras, sin embargo, su implementación depende de factores como son la topografía, características físicas del suelo, el tipo de cultivo, la disponibilidad y la calidad del agua, costos, entre otros.

Según Fernández, Ávila, López, Gavilán y Oyonarte (2010) el método de riego localizado consiste en entregar el agua sólo a una zona determinada del suelo y no a su totalidad, característica que lo diferencia de los demás tipos de riego ya mencionados. Por su parte, Liotta, Carrión, Ciancaglini, y Olguín (2015) y Dalone y Patil (2015) precisan que el sistema de riego por goteo, es un sistema presurizado que permite transportar el agua a través de una red de tuberías y suministrarla a las plantas por medio de emisores llamados goteros que proporcionan pequeños volúmenes del recurso hídrico de manera periódica. Keller y Karmeli (1974), afirman que este método de riego permite proporcionar agua filtrada de manera directa sobre la superficie del suelo o dentro del mismo, puesto que no se presenta escorrentía superficial, la cual afecta la eficiencia de aplicación y la uniformidad de distribución, además Provenzano y Pumo (2004) consideran este sistema de riego como un método de aplicación óptimo para el uso eficiente del agua sobre todo en zonas de escasas hídrica. Así mismo, el agua junto con los nutrientes es proporcionada mediante emisores que se encuentran insertados en una red de tuberías denominadas laterales de riego, por lo que para llevar a cabo un adecuado diseño es de vital importancia considerar con exactitud las pérdidas por fricción y localizadas (Bedoya y Ángeles, 2017).

2.1 Pérdidas por fricción y localizadas

Los diseños en los sistemas de riego se hacen con el propósito de dimensionar la disposición y el tamaño de cada uno de los componentes del sistema, de tal manera que se cumpla con el objetivo de hacer llegar el agua a las plantas bajo ciertas restricciones de energía, economía, mano de obra y disponibilidad de agua (Howell y Barinas, 1980); de ahí la importancia de poder calcular de una manera adecuada las diferentes pérdidas de presión que se puedan presentar en cada componente, ya que por ejemplo en una conducción, cuando el agua pasa por ciertos puntos específicos como los codos, derivaciones, válvulas, cambios de sección entre otros, se originan turbulencias que dan lugar a la aparición de pérdidas energéticas distintas a las pérdidas por rozamiento, en el caso puntual de los laterales de riego por goteo, al insertar los emisores en la manguera, la lengüeta de los mismos modifica las líneas de flujo dentro de la tubería induciendo una turbulencia que da lugar a las pérdidas en mención (Yildirim, 2010); dichas pérdidas se denominan pérdidas de carga localizadas. Es importante mencionar que, en una subunidad de

riego, las pérdidas localizadas más importantes se deben a las conexiones de los emisores en los laterales y de los laterales en la tubería terciaria (Turégano, 2014).

Muchos diseñadores parten de la premisa que las pérdidas menores son insignificantes y pueden ser despreciadas, sin embargo, estas pueden convertirse en un porcentaje significativo de las pérdidas totales (Provenzano y Pumo, 2004; Yildirim, 2010). En sistemas de riego por goteo con emisores en línea o sobre la línea se genera una cantidad de pérdidas a lo largo del lateral que afectan seriamente la disponibilidad de presión en las boquillas de los goteros (Dalone y Patil, 2015); según Yildirim (2007) afirma que estas pérdidas localizadas, también denominadas pérdidas “menores” no pueden ser despreciadas ya que en algunos casos se puede llevar a cometer errores de hasta el 25% en la elección de diámetros de tubería y el 7% en la determinación de las longitudes de los laterales. Por su parte en estudios realizados AI-Amoud (1995) observó un aumento en la pérdida de energía de más del 32% en comparación con un tubo simple para laterales de 13 mm de diámetro, las cuales fueron generadas por la obstrucción de la lengüeta del emisor, en donde el diámetro de la tubería lateral también genera un efecto importante. Puede que un solo emisor provoque una pérdida local muy pequeña, sin embargo, cuando se instalan varios emisores a lo largo del lateral puede generarse una fracción importante de la pérdida total de energía (Perea, Enciso y Singh, 2013).

Partiendo del hecho de que las pérdidas por fricción están en función de factores como el diámetro de la tubería, la rugosidad de la misma, el caudal a transportar, entre otros, se debe tener en cuenta que por lo general los sistemas localizados de alta frecuencia requieren del uso de tuberías con múltiples salidas; en el caso de los sistemas de riego por goteo se insertan en los laterales un importante número de emisores “goteros” que generan una deformación en la tubería, adicionalmente la obstrucción de la lengüeta de los mismos ocasionan un importante efecto sobre las pérdidas localizadas (Bedoya y Ángeles, 2017), por otra parte, a medida que avanza el flujo por la tubería los goteros van realizando la respectiva descarga de agua, disminuyendo de esta manera el caudal que se transporta, lo cual se ve reflejado en una disminución de las pérdidas localizadas siempre y cuando se trate de una tubería con diámetro, material y demás características uniformes, contrario al efecto anterior; es por esta razón que se hace necesario un cálculo hidráulico tramo a tramo para poder dimensionar la tubería, sin embargo, muchos investigadores han desarrollado expresiones matemáticas que logran estimar las pérdidas localizadas de la manera más aproximada para poder dimensionar correctamente los componentes del sistema (Ángeles, Arteaga, Vázquez, Carrillo, y Ibáñez, 2007).

La ecuación de Darcy – Weisbach es catalogada como de uso universal para calcular las pérdidas por fricción en tuberías empleando el factor de fricción de Colebrook-White por su exactitud, sin embargo se torna un poco dispendioso su aplicación; por tratarse de una ecuación implícita, para encontrar el resultado es necesario el uso de un proceso iterativo, por esta razón, modelos empíricos reemplazan esta ecuación con similar grado de exactitud, pero con mayor grado de simplicidad (Farrás, 2013).

Actualmente uno de los modelos más aceptados para el cálculo de pérdidas por fricción en tuberías con salidas múltiples es el propuesto por Christiansen (1942), no obstante, presenta una serie de limitaciones que son necesarias para su aplicación tales como: todas las salidas de la

tubería deben estar igualmente espaciadas, todas las salidas deben tener igual descarga, la distancia entre la primer salida y el inicio de la tubería debe ser igual al espaciamiento entre las demás salidas, no debe haber salida en el extremo de la tubería, el diámetro de la tubería y su factor de fricción debe ser igual en toda la longitud. Aun así, sigue siendo el modelo utilizado en diseño por excelencia (Bedoya y Ángeles, 2017),

Basado en las limitaciones anteriores, diferentes investigadores han propuesto modificaciones al modelo original con el ánimo de optimizarlo; algunos ejemplos como el de Scaloppi (1988) quien realizó una modificación a la ecuación de Christiansen para calcular las pérdidas en tuberías con salidas múltiples sin importar la distancia entre la entrada del tubo y el primer emisor, Ángeles et al. (2007) por su parte propusieron una modificación para aplicar el modelo cuando existe un caudal aguas abajo de la última salida, mientras que Chinea y Dominguez (2006) realizaron un modelo similar para el cálculo de pérdidas en tuberías mixtas, Detar (1982) presenta una tabla de multiplicadores apoyado en un método gráfico para facilitar los cálculos de las pérdidas.

Como ya se ha venido mencionando, la obstrucción de la barra sólida (lengüeta) del gotero insertado en el lateral generan importantes pérdidas localizadas, por lo tanto, diferentes investigadores han dedicado esfuerzos a estudiar dicho fenómeno obteniendo modelos matemáticos que arrojan como resultados valores de pérdidas expresados en longitud equivalente para luego ser sumado a las demás pérdidas o bien sea en forma de factor multiplicador de las mismas.

Keller y Bliesner (1990), presentaron una expresión matemática como factor multiplicador que relaciona el espaciamiento entre emisores y las pérdidas por conexión de los emisores en diferentes diámetros de tubería, asimismo, Rodriguez, Juana, Sánchez y Losada (2004) desarrollaron una expresión matemática para el cálculo de dichas pérdidas basándose en la relación entre el área del tubo y el área que ocupa la lengüeta del gotero dentro del mismo, al igual que Bagarello et al. (1997); Provenzano y Pumo, (2004) y Demir et al. (2007). Uno de los más recientes es Bedoya y Angeles (2017) quienes proponen modificar la ecuación de Keller y Bliesner (1990) alcanzando errores promedios inferiores al 5%.

Yıldırım y Agralioglu (2004) llevaron a cabo un estudio con siete métodos de cálculo hidráulico y los clasificaron con el objetivo de compararlos desde el punto de vista de los métodos de solución, los supuestos básicos, las formulaciones utilizadas y las diferencias en la aplicación, determinando de esta manera parámetros como las pérdidas por fricción y los coeficientes de uniformidad ocasionados en cada caso.

Dalone y Patil (2015) evaluaron pérdidas localizadas en laterales de riego por goteo con goteros auto compensados y no auto compensados en línea, para lo que utilizaron diferentes diámetros de manguera y diferentes presiones de operación, obteniendo como resultado que la pérdida de carga está en función del espaciamiento de los emisores y del diámetro de la tubería; las pérdidas aumentan a medida que se disminuye el diámetro y se reduce el espaciamiento entre emisores y vice versa, por otro lado hallaron que las pérdidas por fricción son directamente proporcionales a la presión.

2.2 Coeficiente de Uniformidad (CU)

Una vez diseñado e instalado el sistema de riego, Martínez (1991) afirma que es de gran importancia llevar a cabo una evaluación para comprobar la forma en la cual se aplica el riego y el correcto funcionamiento de la instalación. Por lo anterior, se han establecido algunos parámetros cuantitativos que poseen una escala que permite pronosticar posibles inconvenientes en algún elemento que conforma el sistema. Dentro de estos parámetros es posible estimar la uniformidad de aplicación del riego, ya que como lo asegura Fernández et al. (2010), una baja uniformidad conlleva a problemas en el cultivo presentándose exceso de agua en algunas plantas y déficit hídrico en otras. Además, si se emplea fertirriego, la distribución de los nutrientes no se realiza de manera adecuada causando una alteración en el desarrollo del cultivo y por tanto de la producción.

En sistemas de riego por aspersión y especialmente por goteo se supone que la lámina de agua que se aplica es igual a la profundidad promedio de humedecimiento en el área aplicada siempre y cuando no exista escorrentía; una forma muy común de evaluar que tan lejos o cerca se encuentra un sistemas de riego de este ideal es a través del Coeficiente de Uniformidad (CU) que es la representación estadística del patrón de humedecimiento de los emisores; un valor bajo de este parámetro indica que existen una mayor cantidad de pérdidas y por lo tanto, sería un sistema inaceptable (Merriam y Keller, 1978).

El Coeficiente de Uniformidad (CU) de un lateral está en función de dos factores principalmente: El primero es la variación de la descarga debido a la variación de la presión y el segundo la variación de la descarga entre emisores operados a la misma presión; este coeficiente es usado para determinar intervalos de riego, profundidad de humedecimiento y capacidad del sistema, de tal manera que es aplicable tanto en el diseño como en la administración del sistema de riego (Keller y Karmeli, 1974).

El diseño adecuado de un lateral de riego debe garantizar un CU relativamente alto, el cual se ve afectado considerablemente por las pérdidas de presión, el espaciamiento de los emisores, taponamiento, temperatura del agua y la variabilidad de las características hidráulicas del suelo (Provenzano y Pumo, 2004); de tal manera que para saber si el agua y los fertilizantes, en caso de ser suministrados por medio del sistema de riego, están siendo aplicados de manera uniforme es necesario la evaluación periódica de la uniformidad de la descarga de los emisores y del rendimiento del sistema, dicha uniformidad en sistemas de riego por goteo puede ser expresada por diferentes parámetros en donde se hace necesario la medición de la descarga de una muestra significativa de emisores la cual varía en función del método utilizado. Sin embargo, se debe evitar el taponamiento de emisores, pues en dicho caso los Coeficientes de Uniformidad (CU) pueden variar de manera muy significativa con diferentes metodologías (Camp, Sadler , y Bussher, 1997).

Según Wu (1997) el espaciamiento y el taponamiento de los emisores son los factores más influyentes en la variación del Coeficiente de Uniformidad (CU), pues se determinó que un 10% de taponamiento puede incrementar el Coeficiente de Variación (CV) en un 30% y disminuir el CU en un 10%.

Smajstrla, Boman, Haman, Pitts, y Zazueta (2015), presentan un método para llevar a cabo la evaluación de la uniformidad de aplicación del agua mediante microirrigación en condiciones de campo a través de tres pruebas consecutivas que permiten estimar la uniformidad general de aplicación de agua, la uniformidad hidráulica o variación de presión y la variación del rendimiento del emisor, empleando para tal fin dos nomogramas. La información requerida para su aplicación son los datos de tasa de flujo de los emisores seleccionados y los datos de presión de los mismos para determinar si la baja uniformidad es debida a problemas hidráulicos (presión) del sistema.

Según Pizarro (1996) y Franquet (2003) la uniformidad es una magnitud propia de cada sistema de riego que permite caracterizarlo de algún modo. Interviene tanto en el diseño agronómico a la hora de cuantificar las láminas de agua requeridas como en el diseño hidráulico, debido a que en función de ésta es que se definen los límites de variación del caudal de los emisores, de igual forma, es un parámetro fundamental para la evaluación de un sistema de riego determinado y su variación se debe fundamentalmente a factores constructivos, hidráulicos, envejecimiento de las instalaciones y obturaciones e incluso la diferencia de temperatura.

Abdulrazzaq y Jahad (2014) exponen que el CU más utilizado por la comunidad científica a nivel mundial probablemente es el propuesto por Christiansen (1942) quien manifiesta que para comparar los patrones de aspersores y determinar de qué manera afectan los espaciamientos la distribución del agua, se necesita una expresión numérica que sirva como un índice de la uniformidad, para lo cual propuso una expresión llamada Coeficiente de Uniformidad (CU) que relaciona la desviación estándar de las descargas con respecto al promedio de las mismas.

El mismo autor aclara que los CU se han determinado tanto para el aspersor como para los diferentes patrones geométricos de los mismos, por otra parte, es necesario mencionar que este coeficiente también se aplica de igual forma para los sistemas de riego por goteo. Por su parte Keller y Bliesner (1990) proponen utilizar una ecuación que relaciona el promedio del 25% de los emisores de menor descarga con el promedio de la descarga de todos los emisores, lo que fundamenta unos criterios bastante exigentes, pues lo que se plantea bajo este parámetro es que el 75% del terreno recibe más agua de la necesaria, mientras el 25% estaría recibiendo lo “justo” aunque teóricamente de este 25% la mitad estaría recibiendo más de la media, mientras que el restante estaría recibiendo menos, lo que quiere decir que solamente el 12.5% del terreno estaría recibiendo menos del agua necesaria, por esta razón se considera una estimación exigente sobre todo si se compara con el CU propuesto por Christiansen, sin embargo, esto trae consigo un aumento del costo del sistema de riego por lo que el criterio del diseñador es muy importante (Pizarro, 1996).

Por su parte, Keller y Bliesner (1990), manifiestan que un valor ideal del Coeficiente de Uniformidad es relativo, pues éste depende de diferentes factores como el costo de instalación y administración del sistema, la topografía, la calidad del agua, el tipo de cultivo y su respuesta al déficit hídrico, entre otros, de tal manera que proponer un valor alto o bajo de este parámetro puede ser equivocado; sin embargo, en la tabla 1 se presenta una clasificación propuesta por la ASAE.

Tabla 1. *Clasificaciones de uniformidad del sistema de microirrigación.*

Clasificación	Uniformidad de descarga del emisor
Excelente	>90%
Buena	90% - 80%
Justa	80% - 70%
Regular	70% - 60%
Inaceptable	<60%

Nota. Recuperado de ASAE (1996) citado por Smajstrla et al (2015)

A pesar de que el Coeficiente de Uniformidad es un parámetro que evalúa el estado actual de un sistema de riego, indirectamente también se convierte en un parámetro de identificación de los principales factores que afectan dicha uniformidad, como defectos de fábrica de los emisores, factores medioambientales, diseño del sistema, entre otros, proporcionando de esta manera herramientas que le permitan al diseñador tomar las mejores decisiones para incrementar el rendimiento de los sistemas de riego; un ejemplo claro es la investigación desarrollada por Moazed, Bavi, Boroomand-Nasab, Naseri, y Albaji (2010) en sistemas de riego por aspersión en donde se logró establecer en base a Coeficientes de Uniformidad que la inadecuada disposición de los aspersores en campo, el incremento de la velocidad del viento y el distanciamiento excesivo de los aspersores disminuyen notablemente la uniformidad de la aplicación del riego, trayendo consigo consecuencias poco favorables. En ese sentido Abdulrazzaq y Jahad (2014) proponen incrementar el Coeficiente de Uniformidad de un sistema de riego por aspersión mediante la implementación de una red conectada en forma de bucle, es decir alimentando los laterales por ambos lados.

Se espera que la uniformidad de un sistema de riego localizado de alta frecuencia sea muy superior a las obtenidas mediante la implementación de otros sistemas de riego debido a que los bulbos húmedos se forman directamente en la zona radicular, aun así son muchos los factores que influyen en el funcionamiento hidráulico del sistema de riego, entre los más destacados se encuentran la variabilidad de funcionamiento espacial que hace referencia a la uniformidad de fabricación de los emisores, la variabilidad temporal que hace referencia al envejecimiento de los mismos, el diseño e instalación y factores ambientales, entre otros (Rodríguez y Puig, 2012). Por otra parte, existe un alto riesgo de obturación o taponamiento de los emisores debido a la sedimentación dentro de las líneas de riego, modificando el funcionamiento del sistema y alterando de esta manera los Coeficientes de Uniformidad (Loboa, Ramírez, y Díaz, 2011).

Barragan et al. (2005) compararon diferentes expresiones de uniformidad y encontraron una alta correlación entre ellas. Como producto de su estudio, concluyeron que la variación de la descarga del emisor, la relación de flujo del mismo, el Coeficiente de Variación y el coeficiente de Christiansen pueden ser empleados como criterios de diseño.

Kang y Nishiyama (1996) propusieron un método para el diseño de laterales de microirrigación fundamentado en la descarga promedio del emisor y la uniformidad requerida de

aplicación de agua. Para este fin emplearon el método de elementos finitos para llevar a cabo el análisis del funcionamiento hidráulico de un lateral.

2.3 Fundamentación matemática para el cálculo de pérdidas de presión.

En un sistema de riego por goteo, la aplicación del agua se lleva a cabo mediante emisores diseñados para disipar la presión y proporcionar el agua en pequeñas gotas al suelo. Dichos emisores llamados goteros se encuentran situados a lo largo del lateral y su espaciamiento depende del tipo de suelo y cultivo (Zúñiga, 2004).

Ecuación del emisor. Existe una relación entre el caudal descargado y la presión reinante a la entrada de cualquier tipo de emisor, la cual recibe el nombre de ecuación del emisor (1) cuya representación gráfica da como resultado la curva característica del mismo (Martínez, 1993).

$$q = K_d \cdot h^x \quad (1)$$

Donde:

q = Caudal del emisor (L/h).

K_d = Coeficiente de descarga característico del emisor.

h = Altura de presión hidráulica a la entrada del emisor (m.c.a).

x = Exponente de descarga del emisor que depende del tipo de flujo y de su grado de autocompensación.

Carga de operación. En el inicio del lateral de riego se debe aplicar una presión de operación tal que permita garantizar la descarga media del emisor insertado en el mismo. Esta carga de operación se determina mediante la siguiente ecuación (2):

$$h = \left(\frac{q}{K_d} \right)^{\frac{1}{x}} \quad (2)$$

Donde:

h = Carga de operación (m).

q = Caudal medio del emisor (l/h)

K_d = Coeficiente de descarga característico del emisor (ecuación del emisor), adimensional.

x = Exponente de la ecuación del emisor, adimensional.

Pérdida de carga permisible. Para garantizar la variación de caudal que se desea tener dentro de una sección es necesario aceptar unas pérdidas de carga permisibles dentro de la misma. Su estimación se lleva a cabo a través de la ecuación:

$$\Delta H = M(\bar{h} - h_{min}) \quad (3)$$

Donde:

ΔH = Pérdida de carga permisible (m).

\bar{h} = Presión media (m)

h_{min} = Presión mínima (m).

M = Factor M; según Martínez (1991) este factor es la relación entre la diferencia de presiones máxima y mínima de la subunidad de riego y la diferencia entre la media y la mínima de la misma. Además expresa que este valor se encuentra entre 2 y 4.5, y recomienda utilizar $M = 2.5$.

Sin embargo, Keller y Karmeli (1974); citado por Pizarro (1996), manifiestan que este factor depende del número de diámetros que se van a emplear en la misma tubería terciaria o lateral (Tubería telescópica), proponiendo los siguientes valores presentados en la tabla 2.

Tabla 2. Valores del factor M que depende del diámetro.

	M
Diámetro constante	4,3
2 diámetros	2,7
3 diámetros	2,0

No obstante, debido a que es muy apresurado determinar el número de diámetros de la tubería, se recomienda emplear $M = 2.5$.

Pérdidas de carga. En la medida en que el agua recorre las tuberías, va perdiendo presión debido al rozamiento con las paredes de las mismas, cambios bruscos de dirección mediante codos, té, etc., paso por conexiones, entre otros. Esta pérdida de presión se denomina pérdida de carga. De igual manera, también se producirán pérdidas de presión cuando el recorrido del agua en la tubería sea ascendente, mientras que ganará presión cuando sea descendente. Estas pérdidas junto con la topografía del terreno ocasionan diferencias de presión entre los emisores de las tuberías laterales. Por esta razón, se debe garantizar que la presión de entrada a la subunidad de riego pueda permitir que al emisor que está sometido a una baja presión se le proporcione la suficiente para que su descarga sea la apropiada (Fernández et al, 2010).

Ecuación de Darcy -Weisbach. La ecuación más general para estimar la pérdida de carga en conductos con flujo de agua a presión es la de Darcy - Weisbach en la que se aplican algunas leyes de la física clásica (Saldarriaga, 1998).

$$h_f = f \frac{l}{d} \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (4)$$

Donde:

h_f = pérdida de energía por fricción (m).

f = factor de fricción de Darcy (adimensional).

l = longitud del tramo de la tubería en la cual se pierde h_f (m).

d = Diámetro de la tubería (m).

\bar{v} = Velocidad media de circulación del fluido ($m s^{-1}$).

g = Aceleración de la gravedad ($m s^{-2}$)

Además, también se puede expresar la ecuación (4) como la pendiente hidráulica, de la siguiente forma: $J = \frac{hf}{l}$: Pérdida de carga unitaria (Pizarro, 1996)

Por lo tanto

$$J = f \frac{1}{d} \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (5)$$

La pérdida de carga unitaria se puede expresar en (m/m) o en tanto por 100 (m/100 m).

Esta ecuación es universal debido a que puede ser aplicada en todos los regímenes. El factor f también llamado coeficiente de rozamiento es adimensional y varía en función del régimen hidráulico (Pizarro, 1996). El régimen hidráulico se puede clasificar según Pizarro (1996) como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Clasificación del flujo según número de Reynolds.

No. De Reynolds	Régimen
<2000	Laminar
2000 – 4000	Crítico o inestable
>4000	Turbulento

• *Régimen laminar* ($Re < 2.000$):

El coeficiente f en este caso es independiente de la rugosidad de la tubería, está en función del número de Reynolds (Re) y la ecuación que representa este régimen es la de Hagen-Poiseuille:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (6)$$

Reemplazando este factor en la ecuación de Darcy – Weisbach se obtiene la ecuación de Hagen-Poiseuille:

$$J = \frac{64}{Re} \frac{1}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

• *Régimen crítico* ($2.000 < Re < 4.000$):

Para el régimen crítico, el factor f depende solo del número de Reynolds. En este caso el flujo en ocasiones se comporta como laminar y en otras como turbulento, por lo que es inestable. Por esta razón, f se debe encontrar de manera experimental; no obstante, Blasius (1913), dedujo una aproximación para el régimen turbulento liso aplicada en tuberías de plástico con errores menores al 2 %.

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (8)$$

Por lo que sustituyendo este coeficiente en la ecuación de Darcy – Weisbach, para una temperatura de 20 °C se tiene:

$$J = 0.00078 \frac{q^{1,75}}{d^{4,75}} \quad (9)$$

• *Régimen turbulento:*

El régimen se hace turbulento en la medida en que el número de Reynolds va aumentando, de esta manera el Re influye menos en el coeficiente f y por el contrario se ve más afectado por la rugosidad de la tubería. No obstante, algunos autores han propuesto fórmulas que alcanzan una considerable aproximación.

- Para $4.000 < Re < 10^5$: Se emplean las fórmulas de Blasius:

$$J = 0.025 v^{0.25} \frac{q^{1,75}}{d^{4,75}} \quad (10)$$

$$J = 0.00078 \frac{q^{1,75}}{d^{4,75}} \quad \text{Para } t = 20 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (11)$$

Donde:

J = Pérdida de carga unitaria.

q = Caudal transportado por la tubería (m^3/sg).

d = Diámetro de la tubería (m).

$$J = 14,94 v^{0.25} \frac{q^{1,75}}{d^{4,75}} \quad (12)$$

$$J = 0.473 \frac{q^{1,75}}{d^{4,75}} \quad \text{Para } t = 20 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (13)$$

Donde d (mm) y q (l/h).

- $10^5 < Re < 10^6$: Se aplica la ecuación propuesta por Veronese – Datei, en la cual las normas ISO realizan una modificación del coeficiente. Se cumple para $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$J = 0.000894 \frac{q^{1,80}}{d^{4,80}} \quad (14)$$

Donde d (mm) y q (l/h).

Por su parte, Hazen – Williams propuso una ecuación aplicada para el régimen turbulento intermedio válida para varios materiales:

$$q = 0.013 C d^{2,63} J^{0.54} \quad (15)$$

Donde d (mm), q (l/h) y el coeficiente C (tabla 4), que depende del material de la tubería (Pizarro, 1996):

Tabla 4. *Coefficientes C para ecuación de Hazen – Williams.*

Material	C
Plástico	150
Fibro cemento	140
Hormigón	128
Acero nuevo	120
Acero usado	110
Fundición nueva	100
Fundición usada	85

Conexión emisor – lateral. En un lateral de riego por goteo, un emisor insertado causa una pérdida de carga cuya magnitud está en función del diámetro del lateral y las características de la conexión. Para facilitar su estimación, es posible sustituir las conexiones por una longitud equivalente de tubería (f_e) (Keller y Bliesner, 1990). De este modo, la pérdida de carga unitaria corregida por pérdidas de conexión del emisor se determina de la siguiente manera:

$$J' = J \left(\frac{S_e + f_e}{S_e} \right) \quad (16)$$

Donde:

J' = Pérdida de carga unitaria corregida por pérdidas de conexión del emisor.

J = Pérdida de carga unitaria.

S_e = Separación entre emisores (m).

f_e = Longitud equivalente de la conexión (m). Este valor depende del tipo de conexión (sobre la línea, interlínea o microtubos).

Las pérdidas de carga causadas por fricción en tuberías con salidas múltiples se estiman de la siguiente manera, suponiendo que las pérdidas menores causadas por la deformación de la tubería y la parte del emisor insertada se desprecian (Bedoya y Ángeles, 2017):

$$h_f = J' \cdot F \quad (17)$$

Donde:

h_f = Pérdida de carga en tuberías con salidas múltiples.

J' = Pérdida de carga unitaria corregida por pérdidas de conexión del emisor.

F = Factor de Christiansen adimensional. Depende del número de salidas a lo largo de la tubería y del régimen hidráulico.




3. Materiales y métodos

El estudio se realizó sobre un lateral de riego por goteo de 10 metros de longitud, teniendo en cuenta las características del invernadero ubicado en la Granja Experimental de la Universidad Surcolombiana ubicada en el Juncal, jurisdicción del municipio de Palermo Huila, en donde dichos laterales cuentan con una longitud aproximada de 10 metros, por otra parte, se considera que es una longitud suficiente para observar los fenómenos en estudio, además de disminuir los costos de instalación, operación y el consumo de agua debido a la gran cantidad de mediciones a realizar.

Se seleccionaron tres tipos de goteros con diferente conexión que se comercializan en la zona con descarga de 2 l/h, los cuales se insertaron en un lateral con diámetro exterior de 16 mm y 10 m de longitud espaciados cada 0.20 m; este lateral se comparó con uno de emisores insertados por fábrica con el mismo diámetro espaciamiento y descarga.

Los goteros se clasificaron teniendo en cuenta la forma de conexión dentro de la tubería, por ejemplo, el gotero tipo A, tiene la lengüeta biselada, el tipo B lengüeta normal, y el tipo C, es el que está insertado en la tubería por fábrica (Tabla 5). Las pérdidas por fricción y localizadas se realizaron en laterales de 12 mm y 16 mm de diámetro exterior, empleando los goteros tipo A y B.

Tabla 5. Especificaciones de los goteros empleados en el estudio.

Tipo de gotero	Gotero	Caudal de descarga (L/h)	Presión de operación (mca)	Observaciones	Marca Modelo	Muestra
A		2	10	Gotero sobre la línea (botón) autocompensado	Agri +	50
B		2	10	Gotero sobre la línea (botón) autocompensado	Naandanjain (PC)	50
C		2	10	Gotero insertado por el fabricante en línea, no autocompensado	Agrifim Interline	50

Se trabajaron pendientes de 3%, 0%, -1% y -3% considerando como positivas las pendientes cuando el agua va hacia arriba y negativas en caso contrario, teniendo en cuenta los escenarios planteados por Pizarro (1996). El primero de ellos es un lateral a nivel, es decir con pendiente cero en donde la presión mínima se encuentra al final del lateral, el segundo donde el

lateral se encuentra cuesta arriba y la presión mínima también se halla al final, sin embargo en este caso las pérdidas de carga se ven incrementadas por la diferencia de altura, finalmente el tercer escenario donde el lateral se encuentra cuesta abajo, en donde la presión mínima no necesariamente se encuentra al final del lateral sino en un punto intermedio, de este caso se derivan dos situaciones, la primera cuando la ganancia de energía debido a la diferencia de altura no supera las pérdidas generadas en el lateral y la segunda cuando la pendiente hacia abajo es tan grande que la energía que se gana por la diferencia de altura supera las pérdidas generadas en el lateral.

3.1 Localización

El estudio se llevó a cabo en la parte posterior del laboratorio de suelos localizado en las instalaciones de la facultad de Ingeniería de la Universidad Surcolombiana, ubicado en las coordenadas $02^{\circ} 56' 34.1''$ Norte, $75^{\circ} 18' 04''$ Oeste, en la ciudad de Neiva - Huila.

3.2 Muestras de goteros

En la tabla 5 se encuentra consignada la información referente a las especificaciones de los goteros utilizados en el estudio.

3.3 Metodología

Preparación del estudio. Una reja fue utilizada para fijar las pendientes de 3% 0% -1% y -3% empleando un nivel óptico marca Topcon AT-B4/PS. Todos los laterales se fijaron sobre madera de 0,9 cm x 9 cm x 320 m para mayor facilidad a la hora de trabajar cada pendiente establecida, como se aprecia en la Figura 1.



Figura 1. Trazado de línea de referencia en la reja mediante nivel óptico.

El gotero tipo A se insertó en el lateral de dos maneras, teniendo en cuenta la forma del bisel figura 2.



Figura 2. Posiciones de instalación del gotero tipo A.

El suministro de agua se realizó mediante un tanque de plástico de 60 litros de capacidad al cual llegaba agua previamente filtrada, éste se adaptó para instalar la electrobomba marca Perfetti modelo QB60 con una potencia del motor de $\frac{1}{2}$ HP, altura máxima de 35 m y caudal máximo de 40 L/min, en la cual se le incorporó un retorno con una válvula para regular la presión de trabajo en los diferentes laterales (Figura 3).



Figura 3. Sistema de bombeo y lateral de riego por goteo empleados para el estudio.

Los emisores fueron numerados para darle orden a la toma de datos y evitar confusiones. La presión fue registrada a través de un manómetro análogo de glicerina marca Winters en rango de medición 0 a 15 PSI, con precisión de $\pm 1\%$ ANSI/ ASME Grado 1^a (Figura 4), dichas tomas se realizaron en la entrada del lateral, a 1/3, 2/3 y al final del mismo, mediante unas tomas de presión instaladas en cada posición.



Figura 4. Manómetro empleado para la medición de presiones.

3.3.1 Disposición del sistema y toma de datos

Antes de iniciar la prueba se instaló el lateral con la pendiente y tipo de goteros correspondientes, luego se encendió la electrobomba, se abrió el extremo del lateral para extraer cualquier impureza o burbuja de aire del sistema, se reguló la presión de entrada al lateral mediante la estrangulación de la válvula del retorno del sistema, se verificó que no existieran fugas y se tomaron las presiones en cada una de las secciones establecidas en el lateral por separado, verificando en cada medición la presión de entrada. Cabe aclarar que solo para la pendiente de 0% con el emisor tipo A se evaluaron los goteros con una disposición ordenada y una posición aleatoria de acuerdo a la orientación del bisel dentro de la tubería. Así mismo, se evaluaron las pérdidas de laterales con diámetro de 12 mm empleando goteros tipo A y B.

Una vez todas las presiones fueron registradas en cada punto del lateral, se inició el aforo de cada emisor con una probeta graduada de 100 ml durante un tiempo de 36 segundos. El aforo de cada emisor se realizó por triplicado y los datos fueron registrados en una tabla. Este procedimiento se llevó a cabo con cada una de las pendientes establecidas, en donde las mediciones fueron realizadas por una sola persona con el fin de disminuir el error.

Todos los datos obtenidos en cada uno de los laterales y en todas las pruebas se almacenaron en una hoja de Excel del programa Microsoft office 2013, posteriormente el análisis estadístico de los datos se hizo empleando la versión de prueba del Software STATGRAPHICS Centurión XVII.I.

El diámetro interno empleado para determinar las pérdidas por fricción de los dos laterales evaluados se determinó con un Calibrador vernier de pie de rey digital stainless hardened con 0.02 mm/0.001" de exactitud.

3.3.2 Coeficiente de Variación (CV)

Este parámetro se determinó a partir de los datos obtenidos durante las mediciones por triplicado de los cincuenta goteros a lo largo del lateral de estudio para cada uno de los tipos de goteros en la pendiente de 0%. Una vez se obtuvieron los datos fueron Almacenados en una hoja de Excel del programa de Microsoft Office 2013 y se determinó el Coeficiente de Variación (CV) utilizando la ecuación (18).

$$CV = \frac{Sq}{\bar{q}} * 100 \quad (18)$$

Donde:

Sq = Desviación estándar de las descargas de los goteros.

\bar{q} = Caudal medio de las mediciones de las descargas.

3.3.3 Curva Presión – caudal

La curva Presión – caudal se obtuvo mediante la metodología descrita por la norma mexicana mencionada anteriormente (NMX-O-082-SCFI-2001). Para esta prueba se emplearon cinco goteros.

Inicialmente se tomó un tramo de línea lateral y se insertaron los goteros a una distancia entre sí de 0.20 m, siguiendo las recomendaciones del fabricante. El suministro de agua y presión fue llevado a cabo mediante una Electrobomba marca Barnes, modelo QB80, con una potencia del motor de 1 HP, elevación máxima de 60 m y caudal máximo de 50 l/min.

Es necesario mencionar que no se empleó la presión a 1,5 veces la presión máxima descrita por el fabricante de los goteros, ya que no se contó con una bomba que tenga dicha presión, asimismo, la manguera empleada en el ensayo resiste una presión máxima de 35 PSI; por tal razón, los goteros fueron sometidos inicialmente a una presión interna, a partir de 0,3 veces la presión nominal hasta la presión máxima de trabajo descrita por el fabricante. Posteriormente, Se tomaron lecturas de caudal con mínimo cuatro valores de presión con incrementos similares, de tal manera, que se pudieron obtener valores diferentes de descarga en cada una de las diferentes presiones. Estas mediciones de descargas de los goteros se realizaron por triplicado tres minutos después de haber leído la presión de la prueba.

Para goteros no autocompensados (Tipo C), la prueba se llevó a cabo en un solo sentido, donde la presión se incrementó como se mencionó anteriormente. En cada presión se determinó el caudal del emisor con el promedio de las mediciones (Figura 5).



Figura 5. Determinación del Coeficiente de Variación y la curva de Presión – gasto del gotero tipo C.

En el caso de los goteros autocompensados tipo A y tipo B, esta prueba se realizó en dos sentidos, es decir, en orden ascendente y descendente de la presión. De igual manera, se promediaron las lecturas y se encontró el valor de la descarga de cada gotero. En el caso específico de los goteros tipo A no se contaba con el catalogo del fabricante, por lo que se tuvo que realizar más de una prueba para lograr establecer la curva de presión – caudal (figura 6 y 7).



Figura 6. Determinación del Coeficiente de Variación y la curva de Presión – gasto del gotero tipo B.



Figura 7. Determinación del Coeficiente de Variación y la curva de Presión – gasto del gotero tipo A.

Los valores bajos de presión para las pruebas anteriores fueron graduados con un manómetro análogo de glicerina marca Winters, con un rango de 0 a 15 PSI y las presiones superiores a 15 PSI se calibraron con Manómetro digital Digital pressure gauge con precisión de 0.25% FS (Figura 8 y 9).



Figura 8. Calibración de presiones menores a 15 PSI.



Figura 9. Calibración de presiones mayores a 15 PSI.

3.3.4 Relación de áreas

La relación de áreas se puede determinar midiendo las dimensiones del gotero y del tubo para posteriormente hacer los cálculos de área mediante figuras conocidas; sin embargo según Provenzano y Pumo (2004) se recomienda hallarlas mediante la digitalización de fotografías debido a que este segundo método además de estimar el área ocupada por el gotero también estima la deformación que sufre la tubería, de tal manera, que con la ayuda de una cámara fotográfica se tomaron varias fotografías al corte transversal de los dos tipos de diámetro de tubería con los tres tipos de gotero instalado. Luego se seleccionaron tres fotografías de cada gotero en cada diámetro y se procedió a digitalizar las áreas del sistema tubería – gotero a escala, empleando para ello el software *AutoCAD 2016* versión estudiante (Figura 10). La digitalización de los tipos de emisores está en el anexo 16.



Figura 10. Digitalización de las áreas del sistema tubería – gotero mediante el software *AutoCAD 2016* versión estudiante.

3.3.5 Coeficiente de Uniformidad (CU), pérdidas por fricción (hf), localizadas y pérdidas totales

Coeficiente de Uniformidad (CU). Una vez generados los resultados en el lateral, se determinó el Coeficiente de Uniformidad de aplicación, utilizando las ecuaciones que se describen a continuación.

Inicialmente Christiansen (1942) planteó una ecuación que le permitió comparar patrones de aspersores y establecer la influencia de varios espaciamientos en los resultados de la distribución en la aplicación del agua. Con ella es posible determinar el Coeficiente de Uniformidad CU mediante la desviación estándar y el promedio de las descargas de los emisores, mediante la ecuación (19):

$$CU = \left[1 - \frac{\sqrt{\frac{\sum (x - \bar{X})^2}{n-1}}}{\bar{X} * m} \right] * 100 \quad (19)$$

Donde:

CU = Coeficiente de Uniformidad del emisor (%).

\bar{X} = Valor promedio del agua recolectada en los emisores.

m = Número de observaciones.

Luego Keller y Karmeli (1974) dieron a conocer una ecuación para estimar el coeficiente de aplicación CU a partir de pruebas de campo, el cual se encuentra en función del cuarto medio de los caudales más bajos y el caudal medio del emisor.

$$CU = 100 * \frac{q_{25\%h}}{q_{medd}} \quad (20)$$

Donde:

Cu = Coeficiente de Uniformidad del emisor (%).

$q_{25\%h}$ = Caudal medio del 25% de los emisores de menor caudal (l/h).

q_{medd} = Caudal medio del emisor (l/h).

Más tarde Keller y Karmeli (1975) manifestaron una nueva expresión que integra el Coeficiente de Variación de fabricación del emisor, el caudal medio y mínimo, como se indica en la ecuación (21):

$$CU = 100 * \left[1 - \frac{1,27 * CV_f}{\sqrt{ep}} \right] * \frac{q_{mind}}{q_{medd}} \quad (21)$$

Donde:

CU = Coeficiente de Uniformidad del emisor (%).

CV_f = Coeficiente de Variación de fabricación.

ep = Número de emisores por planta.

q_{mind} = Caudal mínimo (l/h).

q_{medd} = Caudal medio del emisor (l/h).

Por su parte Barragán *et al* (2005) plantearon una expresión que permite estimar el Coeficiente de Uniformidad empleando para ello el caudal mínimo, el caudal promedio, el Coeficiente de Variación y el número de emisores por planta que para el caso de investigación actual se asumirá como 1.

$$CU = 1 - \sqrt{\left[1 - \frac{q_{min}}{\bar{q}}\right]^2 + \left[\frac{1.27CV}{\sqrt{N}}\right]^2} \quad (22)$$

Donde:

CU = Coeficiente de Uniformidad del emisor (adimensional).

q_{min} = Caudal mínimo del emisor (L/h).

\bar{q} = Descarga promedio del emisor (L/h).

CV = Coeficiente de Variación del flujo del emisor (adimensional)

N = Número de emisores agrupados por planta (1).

Pérdidas por fricción (hf). Se emplearon las ecuaciones de Darcy Weisbach (Ecuación 23) y Hazen-William (Ecuación 29) para determinar las pérdidas por fricción, posteriormente se seleccionó la ecuación que describió mejor las pérdidas en los diferentes laterales evaluados.

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} \quad (23)$$

Donde:

h_f = Pérdidas por fricción por unidad de longitud (m).

f = Factor de fricción (adimensional).

L = Longitud de la tubería (m).

D = Diámetro de la tubería (m).

V = Velocidad del flujo (m/s).

g = Aceleración de la gravedad (m/s²).

Sin embargo, para utilizar la ecuación de Darcy Weisbach se llevaron a cabo diversos métodos de cálculo del factor de fricción f planteados por diferentes autores y presentados a continuación.

- Bagarello *et al.* (1997) propuso un método para estimar f basado en el número de Reynolds de la siguiente manera:

$$f = \frac{c}{R^m} \quad (24)$$

$$c = \frac{6,152}{R^{0,183}} \quad (25)$$

$$m = \frac{2}{8 - \left(\frac{12,40}{R^{0,157}}\right)} \quad (26)$$

Donde:

f = Factor de fricción.

R = Número de Reynolds.

c y m = Coeficientes en función del número de Reynolds.

- La ecuación de Blasius también fue empleada para calcular el factor de fricción f de la expresión de Darcy-Weisbach de esta forma:

$$f = 0,316 R^{-0,25} \quad (27)$$

Donde:

f = Factor de fricción.

R = Número de Reynolds.

- Así mismo Swamee (1993) también propuso una forma de estimar el factor f en función del número de Reynolds, la rugosidad de la tubería y el diámetro de la misma como se muestra en la siguiente expresión.

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{R} \right)^8 + 9.5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{R^{0.9}} \right) - \left(\frac{2500}{R} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0.125} \quad (28)$$

Donde:

f = Factor de fricción.

R = Número de Reynolds.

ε = Rugosidad media de la tubería.

D = Diámetro de la tubería.

Como se mencionó anteriormente, las pérdidas por fricción también fueron calculadas con la ecuación de Hazen – Williams, la cual involucra la longitud, el diámetro de la tubería, el caudal y el coeficiente de rugosidad característico para cada material.

$$h_f = 0,617 * L * D^{-4,865} * \left(\frac{100 Q}{C} \right)^{1,852} \quad (29)$$

Donde:

h_f = Pérdidas por fricción por unidad de longitud (m).

L = Longitud de la tubería (m).

D = Diámetro de la tubería (mm).

Q = Caudal (L/h).

C = Coeficiente de rugosidad de la tubería ($C_{plástico} = 150$).

Pérdidas localizadas. Para determinar las pérdidas menores se empleó la ecuación propuesta por Keller y Bliesner (1990) para expresar las pérdidas de carga por conexión en longitud equivalente del lateral:

$$J = \frac{S_e + f_e}{S_e} \quad (30)$$

Donde:

J = Pérdida por conexión (m).

S_e = Separación entre emisores (m).

f_e = Longitud equivalente de la pérdida de carga por conexión determinado a través de un gráfico (m).

Pizarro (1996) al igual que Bedoya y Ángeles (2017) emplearon la misma expresión para estimar las pérdidas menores; sin embargo, el método de Pizarro (1996) para encontrar el f_e implica hacerlo de manera gráfica con la ayuda de un ábaco y éste valor depende de los parámetros que definen cada tipo de conexión, mientras que

Bedoya y Ángeles (2017) manifestaron una ecuación determinada experimentalmente que permite estimar la longitud equivalente y está en función de la relación que hay entre el área de la tubería y la que ocupa el gotero dentro de la misma.

$$f_e = 0.305 \left(\frac{A_p}{A_g} \right)^2 - 0.0607 \left(\frac{A_p}{A_g} \right) - 0.2563 \quad (31)$$

Donde:

f_e = Longitud equivalente de pérdidas de carga por conexión.

A_p = Área de la tubería.

A_g = Área del gotero dentro del tubo.

Bagarello *et. al* (1997) expresan las pérdidas menores en función de la ecuación de la carga cinética (h_m), donde esta es multiplicada por un coeficiente de pérdida locales (α). Este coeficiente tiene en cuenta las características de conexión del emisor y la deformación de la tubería que rodea la parte insertada del mismo.

$$h_m = \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (32)$$

$$\alpha = 1.68 \left(\frac{A_p}{A_g} - 1 \right)^{1.29} \quad (33)$$

Donde:

h_m = Pérdidas menores (m).

α = Coeficiente de pérdidas locales.

V = Velocidad del flujo (m/s).

g = Aceleración de la gravedad (m/s²).

A_p = Área de la tubería.

A_g = Área del gotero dentro del tubo.

Pérdidas totales. Las pérdidas totales fueron calculadas con las Ecuaciones que se presentan a continuación:

$$H_f = h_f + h_m \quad (34)$$

$$H_f = h_f + l_e \quad (35)$$

$$H_f = h_f * J \quad (36)$$

Donde:

H_f = Pérdidas totales (m).

h_f = Pérdidas por fricción por unidad de longitud (m)

h_m = Pérdidas menores (m).

J = Pérdida por conexión (m).

3.3.6 Análisis estadístico

Se presenta el arreglo entre los diferentes niveles de cada factor para realizar las respectivas comparaciones, como ya se ha venido mencionando, el propósito es evaluar el comportamiento de los diferentes tipos de goteros en varias pendientes (Tabla 6).

Tabla 6. *Diseño del experimento.*

UNIDAD EXPERIMENTAL	TRATAMIENTOS	
GOTERO TIPO A (16mm)	T1	A (3%)-16mm
	T2	A (0%)-16mm
	T3	A (-1%)-16mm
	T4	A (-3%)-16mm
GOTERO TIPO B (16mm)	T5	B (3%)-16mm
	T6	B (0%)-16mm
	T7	B (-1%)-16mm
	T8	B (-3%)-16mm
GOTERO TIPO C (16mm)	T9	C (3%)-16mm
	T10	C (0%)-16mm
	T11	C (-1%)-16mm
	T12	C (-3%)-16mm
GOTERO TIPO A (12mm)	T13	A (3%)-12mm
	T14	A (0%) -12mm
	T15	A (-1%)-12mm
	T16	A (-3%)-12mm
GOTERO TIPO B (12mm)	T17	B (3%)-12mm
	T18	B (0%)-12mm
	T19	B (-1%)-12mm
	T20	B (-3%)-12mm

Los datos obtenidos en cada tratamiento fueron evaluados mediante Análisis de Varianza simple (ANOVA), en donde la comparación se realizó bajo la prueba de múltiples rangos con diferencia honestamente significativa de Tukey HSD ($\alpha=0,05$), que también fue aplicada mediante un ANOVA multifactorial para establecer las diferencias entre las unidades experimentales.

4. Resultados y discusión

4.1 Relación presión – caudal

Las Figuras 11, 12 y 13 muestran la curva presión descarga para los diferentes tipos de emisores evaluados (A, B y C), los cuales fueron operados dentro del rango de presión de trabajo especificada por el fabricante.

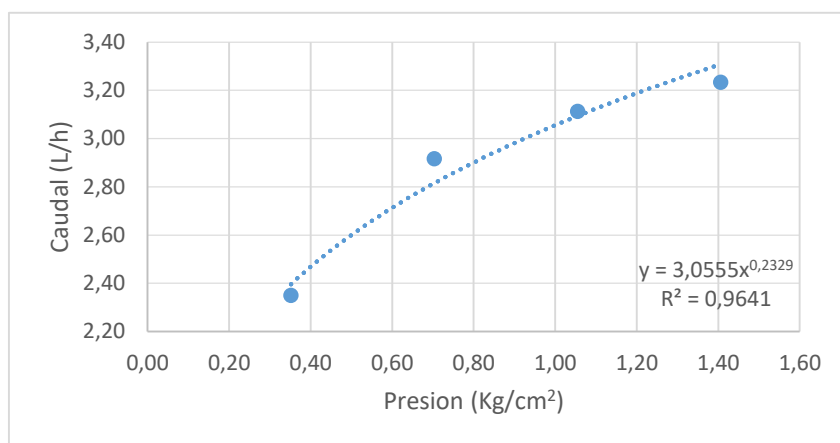


Figura 11. Curva Presión – Gasto del gotero tipo A.

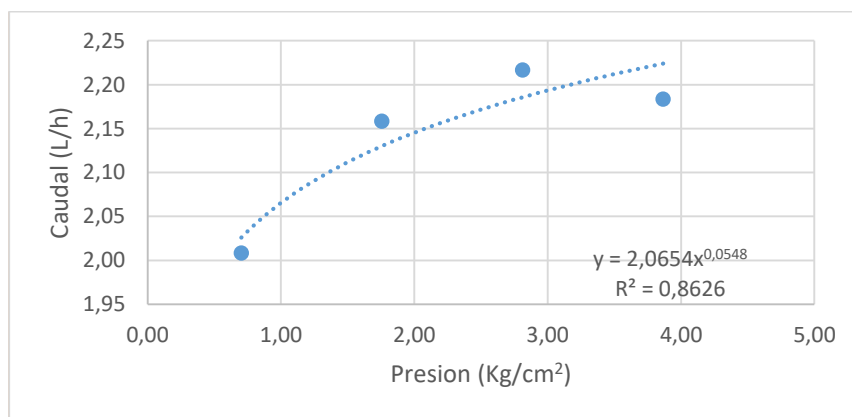


Figura 12. Curva Presión – Gasto del gotero tipo B.

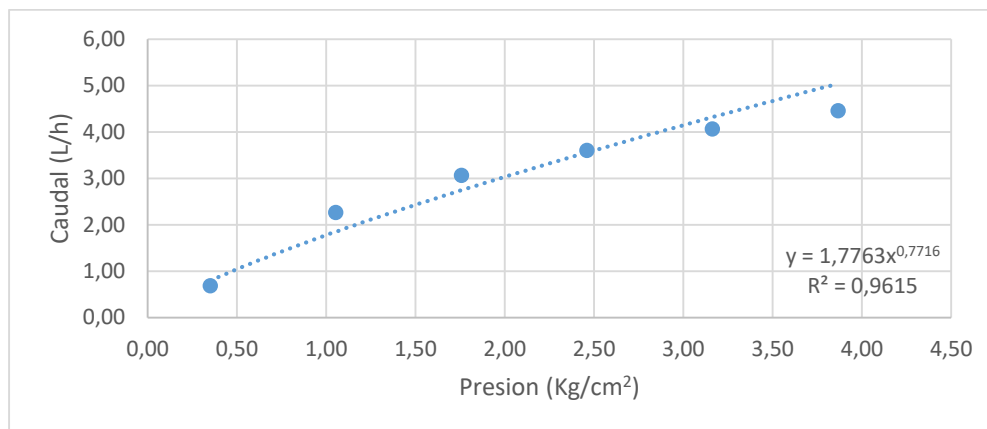


Figura 13. Curva Presión – Gasto del gotero tipo C.

Para el caso del gotero A no se contó con el catálogo del fabricante, y su curva característica (Figura 11) se determinó de manera experimental con rangos de presiones similares a la de los otros dos emisores, sin embargo, se comprobó que a presiones superiores a 1.41 kg/cm² el caudal comienza a decrecer, por lo tanto, se realizó la prueba tomando como rango de presión máximo 1.41 kg/cm², además, Perea et al (2013), en su trabajo experimental concluyeron que los goteros autocompensados normalmente presentan CU superiores a los no autocompensados, pero, cuando se operan por fuera del rango recomendado, su desempeño puede ser incluso inferior a un gotero no autocompensado.

En las figuras 11 12 y 13, se observan las curvas de los diferentes tipos de goteros, los cuales, se ajustan a una tendencia de tipo potencial con un R² elevado, con valores que se encuentran entre 0.86 y 0.96. Sin embargo, no es recomendable operar los goteros a presiones superiores al rango de trabajo debido a que el caudal disminuye, como se parecía en las figuras mencionadas.

Por otro lado, los exponentes de las ecuaciones obtenidas en las curvas de cada gotero manifiestan una medida de la sensibilidad a la variación de presión. De este modo, la norma mexicana *NMX-O-082-SCFI-2001* reporta que, para goteros autocompensados el valor del exponente no debe exceder de 0.2 y para goteros sin autocompensación debe estar entre 0.2 y 0.6; por su parte, (Pizarro, 1996) establece que el valor del exponente para un gotero autocompensante se encuentra en un rango de 0 a 0.4. Según estas clasificaciones, se puede decir que los goteros A y B son autocompensados y el gotero C no lo es, ya que los valores de los exponentes de la ecuación del emisor son 0.2329; 0.0548 y 0.7716 respectivamente.

4.2 Coeficiente de Variación

La tabla 7 contiene la información referente al Coeficiente de Variación CV de los diferentes tipos de gotero, calculados a partir de las descargas obtenidas de la totalidad de emisores en el lateral.

Tabla 7. *Coefficiente de Variación promedio de los diferentes tipos de gotero.*

TIPO DE GOTERO	CV
A	0.096
B	0.025
C	0.031

Asimismo, en la Tabla 7 se evidencia que el gotero tipo A presenta el más alto Coeficiente de Variación (CV) a pesar de ser un emisor autocompensado, seguido por el gotero C que no es autocompensado y finalmente el gotero que presenta el menor CV es el tipo B, de tal manera, que según la clasificación hecha por Keller y Bliesner (1990) relacionada en la tabla 8, el gotero tipo A es marginal, mientras que los goteros tipo B y tipo C son excelentes.

Tabla 8. *Clasificación de goteros según CV propuesta por Keller y Bliesner (1990).*

Tipo	Rango de CV	Clasificación
Emisor puntual	$CV < 0.05$	Excelente
	$0.05 < CV < 0.07$	Promedio
	$0.07 < CV < 0.11$	Marginal
	$0.11 < CV < 0.15$	Pobre
	$0.15 < CV$	Inaceptable
Cinta de riego	$CV < 0.1$	Excelente
	$0.1 < CV < 0.2$	Promedio
	$0.2 < CV < 0.3$	Pobre
	$0.3 < CV$	Inaceptable

Por otro lado, según la clasificación propuesta por la norma mexicana relacionada en la tabla 9, el gotero tipo A pertenece a la categoría B mientras los goteros tipo B y C pertenecen a la categoría A.

Tabla 9. *Clasificación de goteros según CV, norma mexicana NMX-O-082-SCFI-2001.*

Coefficiente de Variación	Categoría
$CV < 5 \%$	A
$5 \% < CV < 10 \%$	B

En un estudio hecho por Vélez *et. al* (2013) se reporta que el Coeficiente de Variación (CV) para los goteros análogos al tipo A, B y C son 12,39%, 2,41% y 13,69% respectivamente, siendo el primero un valor aproximado al encontrado en este trabajo el cual pertenece a una clasificación muy cercana según Keller y Bliesner (1990) y a la misma categoría de la norma mexicana, en el caso del segundo emisor (tipo B) los resultados son muy similares, sin embargo, los goteros tipo C arrojaron resultados diferentes de CV.

4.3 Comparación de los caudales de descarga entre pendientes de los tres tipos de gotero

El análisis estadístico se realizó mediante la versión de prueba del software StatGraphics Centurion, con el que se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) simple para la comparación de medias de los caudales entre pendientes, con los diferentes goteros empleados (Tabla 10).

Tabla 10. Comparación de caudales de los tres tipos de gotero entre pendientes para cada diámetro de tubería.

Diámetro	Gotero	Pendiente				
		-3	-1	0	*0	3
16 mm	A	3,05 ± 0.29 a	3,02 ± 0.28 a	3,04 ± 0.30 a	2,94 ± 0.26 a	3,05 ± 0.30 a
	B	1,97 ± 0.04 ab	1,96 ± 0.04 ab	1,95 ± 0.05 a	Na	1,98 ± 0.04 b
	C	2,18 ± 0.07 b	2,17 ± 0.07 ab	2,15 ± 0.06 a	Na	2,22 ± 0.06 c
12 mm	A	3,11 ± 0.28 a	3,11 ± 0.27 a	3,15 ± 0.28 a	Na	3,13 ± 0.28 a
	B	1,99 ± 0.04 a	2,00 ± 0.03 a	1,99 ± 0.03 a	Na	1,99 ± 0.04 a

Media ± desviación estándar. Letras diferentes en la misma fila indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre pendientes con el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey.

*Disposición ordenada de los biseles del gotero A.

Na: No aplica.

En la tabla 10 se observa que el gotero tipo A presentó la mayor dispersión de las descargas, sin embargo, con este tipo de goteros no existen diferencias estadísticamente significativas entre las pendientes evaluadas. De igual forma, se comprobó que el gotero tipo A, no es un emisor de 2.0 l/h como lo afirman los vendedores, sino un emisor de 3 l/h. En su investigación Vélez *et. al* (2013), evidenció que a pesar de que los emisores son adquiridos bajo un caudal de descarga determinado, normalmente este valor es superior o inferior al reportado por el fabricante, quien cuenta con sus propios métodos de control de calidad basados en normas existentes, sin embargo, el autor afirma que no existen mecanismos de control y vigilancia en el país que garanticen dichas especificaciones al comprador.

Los goteros autocompensados tipo B presentaron diferencias estadísticamente significativas solamente con la pendiente de 3%, pero, con un alfa de 0.05 en las otras pendientes y diámetros evaluados, no se evidenció diferencias importantes estadísticamente hablando. Finalmente, los emisores tipo C no autocompensado, con un nivel de significancia del 95% presentó diferencias estadísticamente significativas con todas las pendientes en la tubería de 16 mm de diámetro exterior; dichos resultados concuerdan con lo expuesto por Smajstrla *et al* (2015), quien manifiesta que las descargas de los emisores autocompensados son relativamente insensibles a los cambios de presión mientras que los no autocompensados no tienen esta capacidad.

En la figura 14 se encuentra representada la información correspondiente a la comparación de las medias de los caudales de los tres tipos de gotero para cada pendiente, insertados en la tubería de 16 mm; los intervalos sobre las barras representan la desviación estándar. Letras diferentes entre las barras del mismo color indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) del caudal entre pendientes. De este modo, con un

nivel de confianza del 95% se observa que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las descargas medias y las pendientes del gotero A.

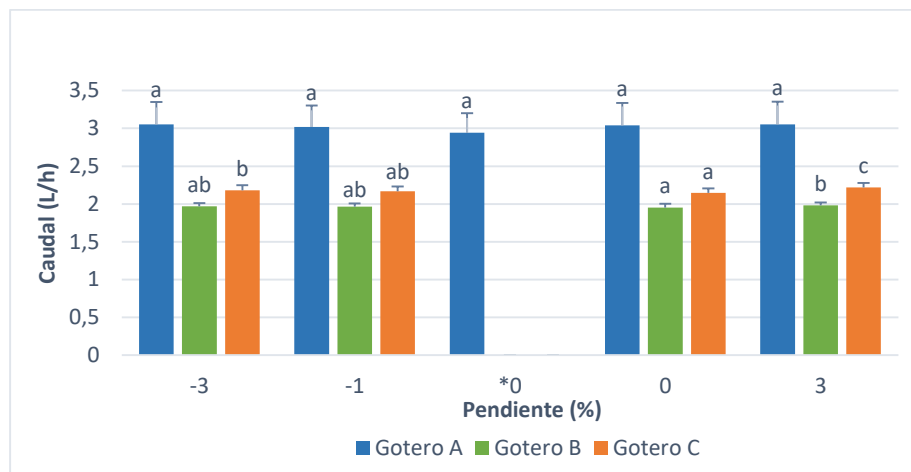


Figura 14. Medias de los caudales de los tres tipos de gotero en tubería de 16 mm de diámetro en las diferentes pendientes.

Las medias de las descargas del gotero B no exhiben diferencias estadísticamente significativas entre las pendientes -3 %, -1 % y 0 %, y -3 %, -1 % y 3 %; pero sí entre las pendientes 0 % y 3 %; aun así, los caudales se encuentran entre 1.95 y 1.99 l/h, de manera que se acercan al valor reportado por el fabricante. Es importante mencionar que este tipo de gotero presenta una descarga de 2 l/h a lo largo de toda la prueba para la mayoría de goteros.

En el caso del gotero C, las diferencias estadísticamente significativas se presentan entre las pendientes -3 %, 0 % y 3 %; mientras que en las pendientes de (-3 %, -1 %) y (-1 %, 0 %) sucede todo lo contrario, ya que sus respectivos valores se encuentran muy cercanos. Por otra parte, también se logra apreciar que la descarga descrita en la pendiente 0 % es la más baja, seguida por las pendientes -1 % y -3 % y finalmente 3 %.

La información referente a los goteros A y B en la tubería de 12 mm con las pendientes establecidas se puede apreciar en la figura 15.

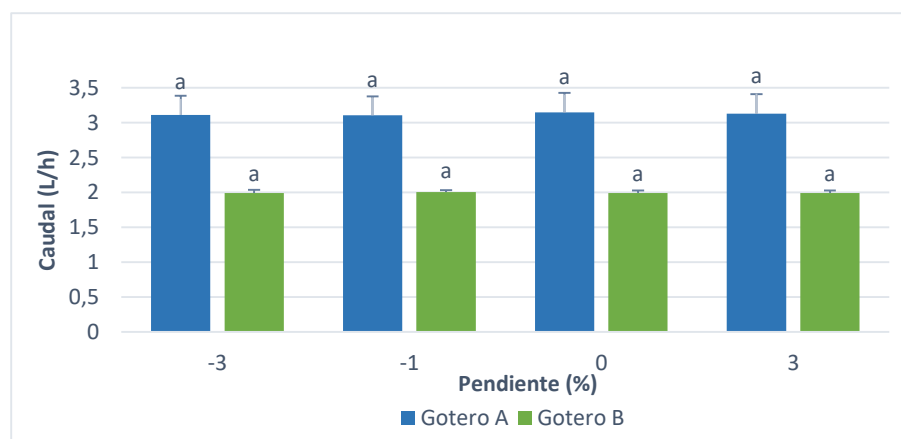


Figura 15. Medias de los caudales de los tipos de gotero A y B en tubería de 12 mm de diámetro en las diferentes pendientes.

Los goteros A y B insertado en el lateral de 12 mm de diámetro exterior no presentan diferencias estadísticamente significativas entre las descargas y las diferentes pendientes. La variación descrita por las medias de las descargas está entre 1,98 y 2 l/h.

4.4 Comparación del caudal del gotero entre diámetros y pendientes

Gotero A. La comparación de los caudales del gotero A con los dos diámetros de tubería en las pendientes evaluadas, fue realizada a través de un análisis de varianza de varios factores (diámetro de tubería y pendiente). Mostrando que el factor diámetro, tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la descarga de este emisor con un nivel de confianza del 95 %. El método empleado para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey (Figura 16).

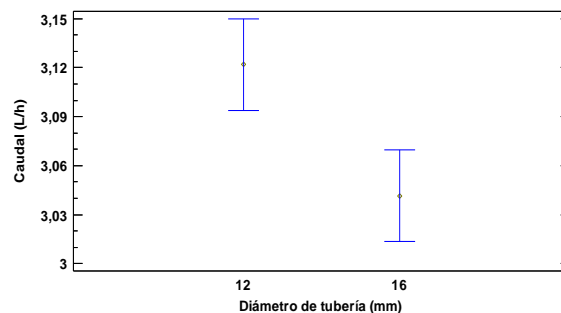


Figura 16. Medias del caudal del gotero A por diámetro de tubería.

Por otra parte, en la prueba de Múltiples Rangos para caudal del gotero A por pendiente, se encontró que no hay diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95 % de confianza (figura 17).

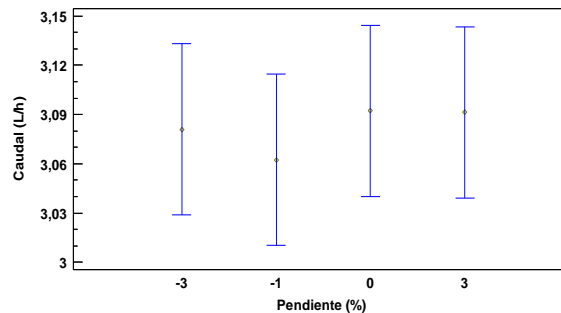


Figura 17. Medias del caudal del gotero A por pendiente.

En la Figura 18 se muestra la significancia entre las interacciones de los factores diámetro y pendiente, las líneas conectan las medias de los caudales para las cuatro pendientes. Evidenciando que existe una leve interacción entre los factores diámetro y pendiente, ya que las líneas no son paralelas.

De este modo, el comportamiento descrito por los caudales entre las pendientes -3 %, -1 % y 0 % es similar; no obstante, entre las pendientes 0 % y 3 % sucede lo contrario, por

lo que la descarga decrece en el diámetro de 12 mm, mientras que en el de 16 mm tiende a aumentar (figura 18).

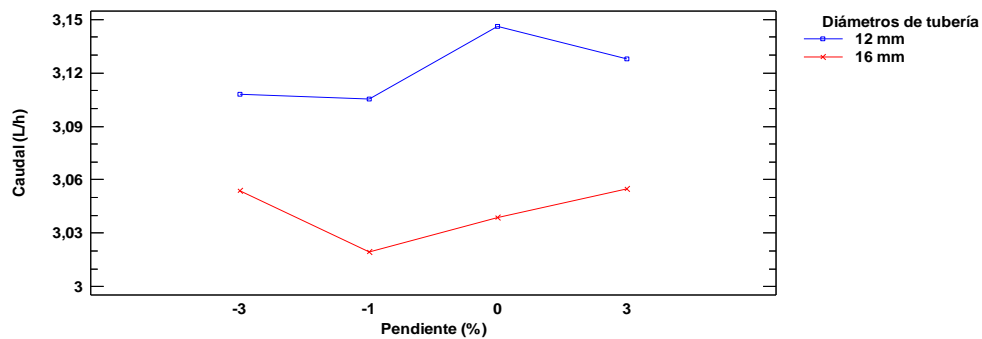


Figura 18. Interacción entre los factores Diámetro de tubería y pendiente para el gotero A.

Gotero B. Para los goteros B también se realizó la misma comparación de caudales entre los dos diámetros para las pendientes evaluadas. El análisis de varianza arrojó que el diámetro tiene efecto estadísticamente significativo sobre la descarga de los caudales.

Con respecto a la prueba de Múltiple Rangos para caudal del gotero B por pendiente, se pudo establecer que no existen diferencias estadísticamente significativas, (figura 19); Por el contrario, sí se encontraron diferencias entre las medias en la prueba de caudal por diámetros, con un 95 % de confianza (Figura 20).

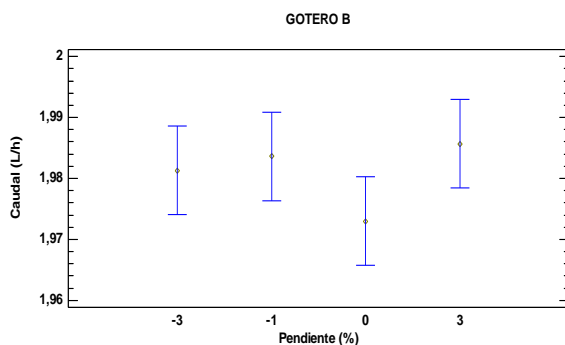


Figura 19. Medias del caudal del gotero B por pendiente.

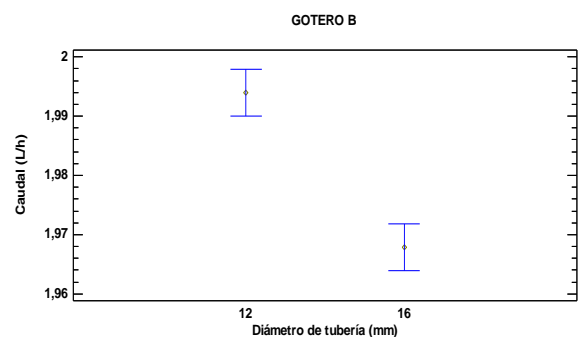


Figura 20. Medias del caudal del gotero B por diámetro de tubería.

En cuanto a la significancia de las interacciones entre los factores, en la figura 21 se observó que los factores diámetro y pendiente presentan una interacción pronunciada cuando se incrementa la pendiente de 0% a 3%, mientras en el diámetro de 12mm la descarga disminuye, en el diámetro de 16mm incrementa fuertemente.

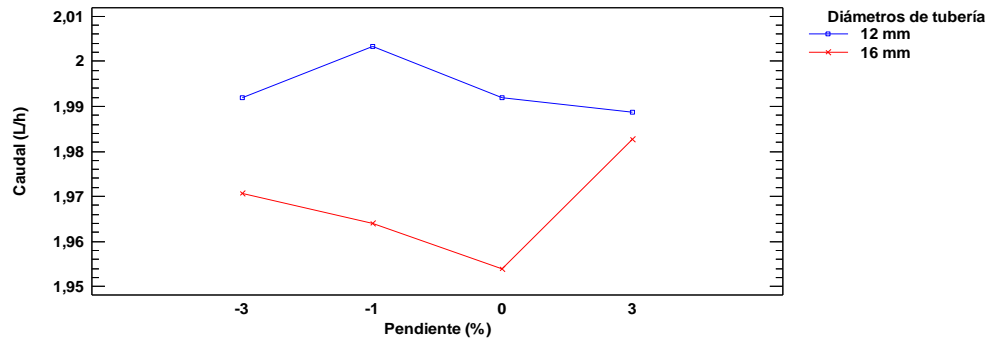


Figura 21. Interacción entre los factores Diámetro de tubería y pendiente para el gotero B.

Para el caso de la tubería de 12 mm de diámetro, el caudal tiende a aumentar entre las pendientes -3 % y -1 %, luego disminuye entre -1 % y 0 % y finalmente se mantiene estable entre 0 % y 3 %. Por otro lado, en el diámetro de 16 mm estos valores se comportan de manera decreciente entre las pendientes -3 % y 0 % pasando por -1 %, para luego incrementarse de manera evidente entre 0 % y 3 %.

4.5 Comparación del caudal de los goteros b y c en tubería de 16 mm de diámetro entre pendientes

Los factores analizados fueron la pendiente y el tipo de gotero en la tubería de 16 mm de diámetro exterior, El ANOVA factorial arrojó como resultado que los dos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre el caudal con un 95% de nivel de confianza.

Con relación a la prueba de Rangos Múltiples, estas indican que sí existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los caudales para las pendientes y para el tipo de gotero, (Figuras 22 y 23 respectivamente). Este comportamiento se debe a la poca sensibilidad que tiene el emisor B (autocompensado) a la variación de la presión, en comparación con el gotero C (no autocompensado).

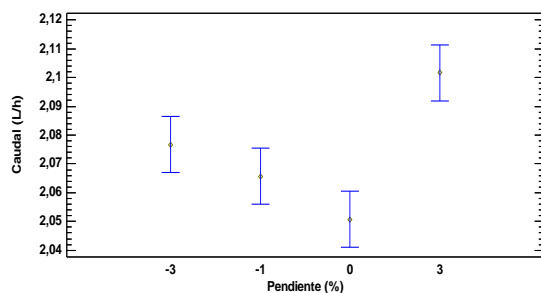


Figura 22. Medias del caudal del gotero B y C por pendiente, insertados en tubería de 16mm.

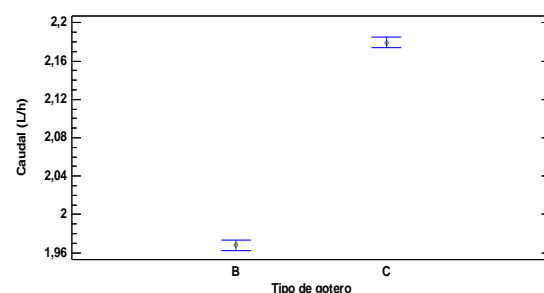


Figura 23. Medias del caudal de los goteros B y C insertados en tubería de 16mm.

4.6 Coeficiente de Uniformidad (CU)

La Figura 24, ilustra el comportamiento del Coeficiente de Uniformidad (CU), mediante diferentes metodologías y pendientes con el gotero tipo A insertado en tubería de 16 mm de diámetro exterior; en esta se puede observar para cada metodología las diferencias estadísticamente significativas según la prueba de múltiples rangos Tukey HSD ($\alpha=0.05$) del CU entre las pendientes, las cuales se encuentran demarcadas en la parte superior de las barras con letras diferentes en caso de existir diferencias significativas y letras iguales en caso contrario.

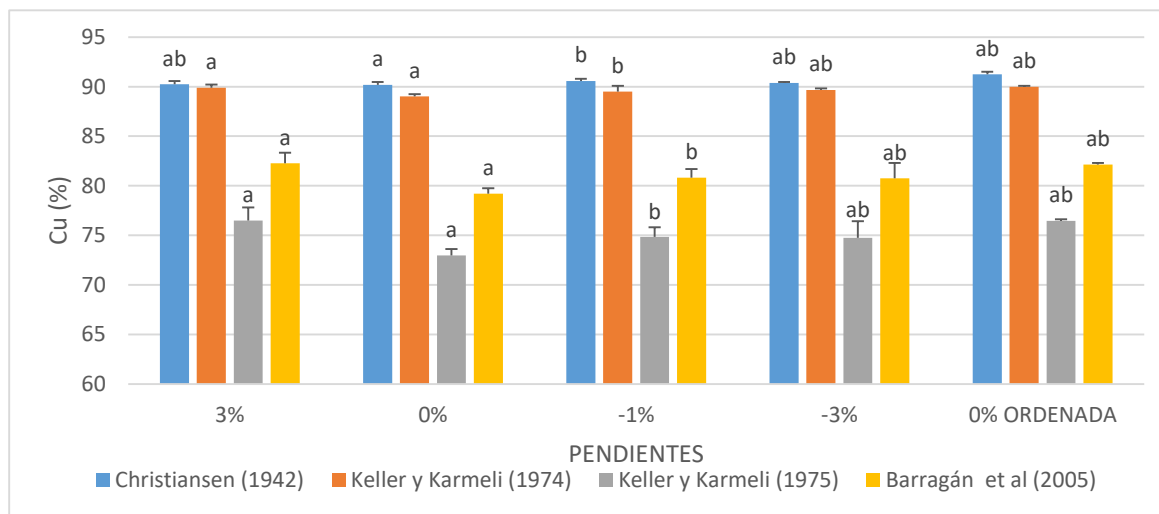


Figura 24. Coeficiente de Uniformidad, según diferentes metodologías para cada pendiente con goteros tipo A en lateral de 16mm.

En la Figura 24 se evidencia que la metodología de Christiansen (1942), no presenta variaciones del Coeficiente de Uniformidad (CU) en las pendientes evaluadas con un alfa igual a 0.05, sin embargo, las otras metodologías con un nivel de significancia del 95% si presentaron diferencias estadísticas, especialmente con la pendiente de -1%.

Asimismo, se observa que ordenar el emisor A de acuerdo al bisel dentro de la tubería de 16 mm, si genera un efecto positivo incrementando el CU, debido al área que ocupa la conexión del gotero dentro de la sección transversal del flujo, a pesar de que no se presente una diferencia estadísticamente significativa en relación con las otras pendientes (Anexo 17).

La figura 25 presenta el comportamiento del Coeficiente de Uniformidad calculado mediante diferentes metodologías para cada pendiente del gotero tipo B instalado en el lateral de riego con diámetro exterior de 16 mm; en la que se puede observar para cada metodología las diferencias estadísticamente significativas según la prueba de múltiples rangos Tukey HSD ($\alpha=0.05$) del CU entre las pendientes.

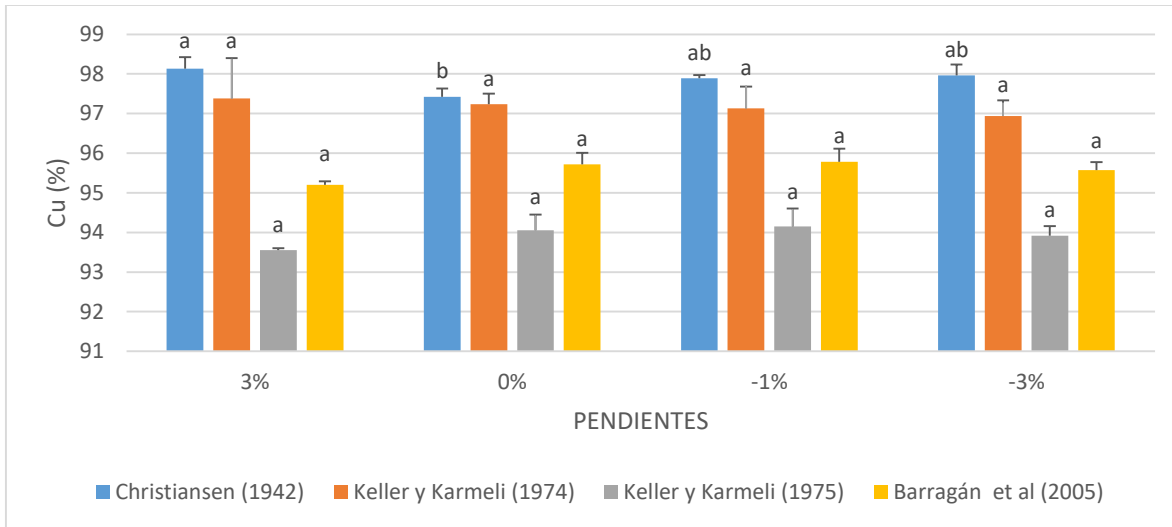


Figura 25. Coeficiente de Uniformidad, según diferentes metodologías para cada pendiente con goteros tipo B en lateral de 16mm.

Se evidencia en la Figura 25 con un nivel de confianza de 95%, que existen variaciones del CU empleando la metodología de Christiansen (1942), específicamente en pendiente 0%, sin embargo, con las otras metodologías no se presentaron diferencias estadísticamente significativas con alfa igual a 0.05 en todas las pendientes evaluadas.

La figura 26 muestra el comportamiento del Coeficiente de Uniformidad de un gotero no autocompensado (tipo C), evidenciando con la metodología de Keller y Karmeli (1974) variaciones estadísticas con un nivel de confianza del 95% específicamente en la pendiente de -1%. Con las otras metodologías no existen variaciones estadísticas del CU con alfa igual a 0.05 en las pendientes evaluadas.

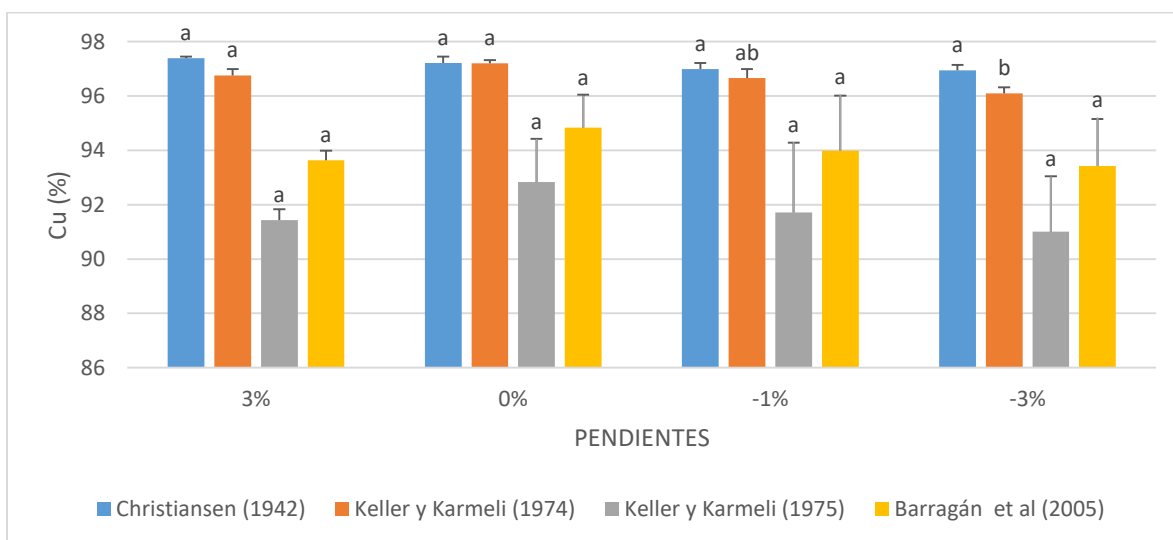


Figura 26. Coeficiente de Uniformidad, según diferentes metodologías para cada pendiente con goteros tipo C en lateral de 16mm.

La figura 27 ilustra el comportamiento del Coeficiente de Uniformidad del gotero tipo A instalado en el lateral de riego con diámetro nominal de 12 mm; demostrando con un nivel de confianza del 95% que no se presentan diferencias estadísticamente significativas entre los CU y las diferentes pendientes. Con este diámetro se observa una mayor dispersión de los datos, especialmente en las metodologías de Keller y Karmeli (1975) y Barragan et al (2005), las cuales tienen en común que basan sus modelos en el Coeficiente de Variación del emisor y el caudal mínimo, por lo que se presume que la variación en mención se debe a estos parámetros.

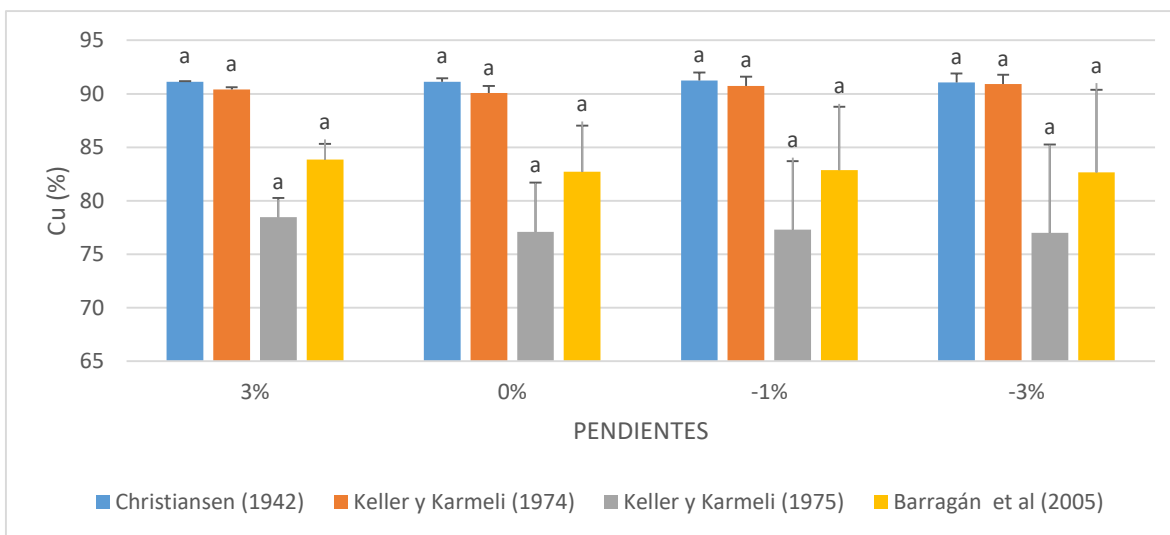


Figura 27. Coeficiente de Uniformidad, según diferentes metodologías para cada pendiente con goteros tipo A en lateral de 12mm.

La figura 28 presenta el comportamiento del Coeficiente de Uniformidad del gotero tipo B instalado en el lateral de riego con diámetro exterior de 12 mm, en ella se establece que existen diferencias estadísticas con un nivel de confianza del 95% con la metodología de Keller y Karmeli (1974), específicamente, entre las pendiente -1% y 3%, así como, entre la pendiente -1 y -3%.

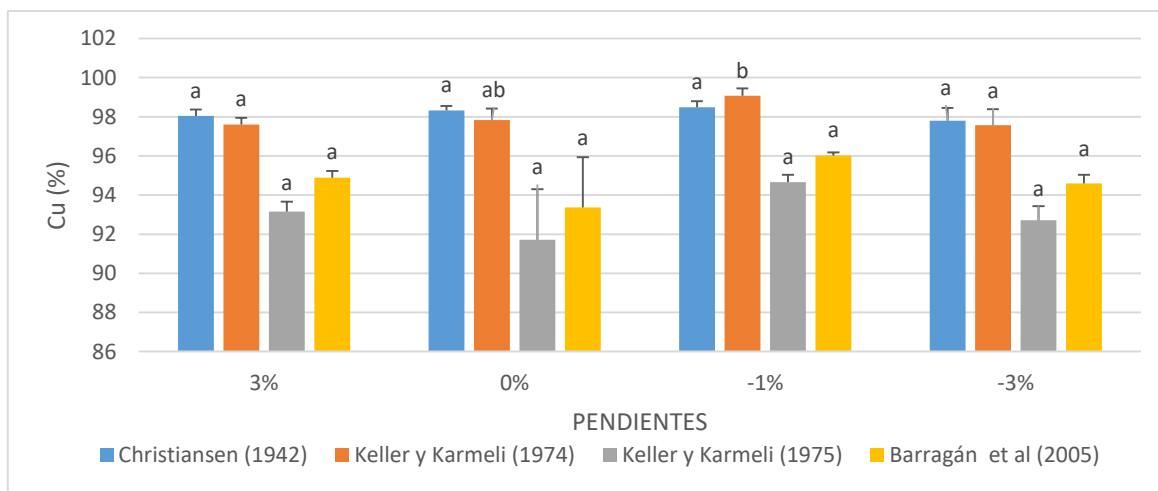


Figura 28. Coeficiente de Uniformidad, según diferentes metodologías para cada pendiente con goteros tipo B en lateral de 12mm.

Las figuras 29 y 30 presentan el comportamiento del Coeficiente de Uniformidad calculado mediante diferentes metodologías para cada tipo de gotero evaluado, insertado en la tubería de 16 mm y 12 mm respectivamente; en las que se observa para cada metodología las diferencias estadísticamente significativas según la prueba de múltiples rangos Tukey HSD ($\alpha=0.05$) del CU entre los diferentes tipos de gotero.

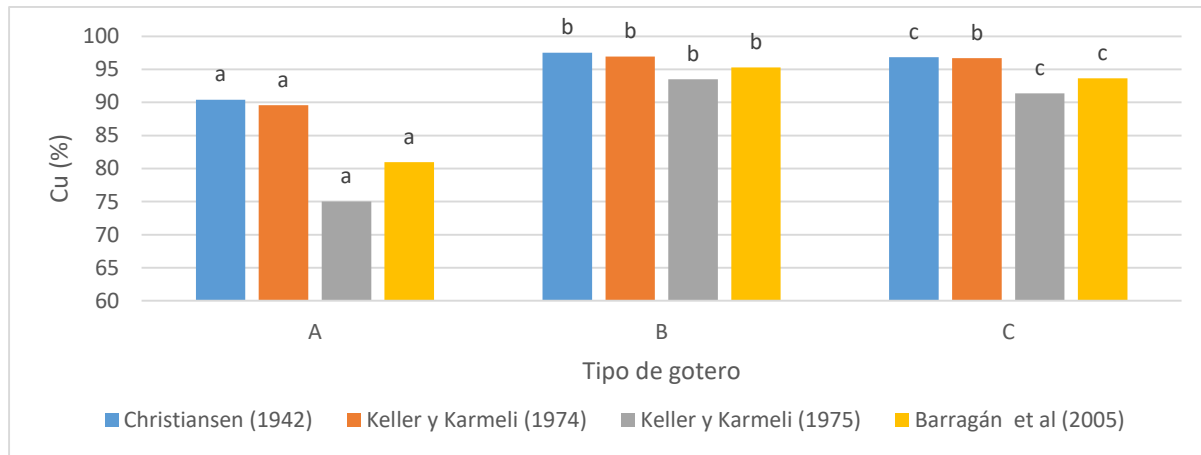


Figura 29. Coeficiente de Uniformidad, según diferentes metodologías para cada tipo de gotero en lateral de 16 mm.

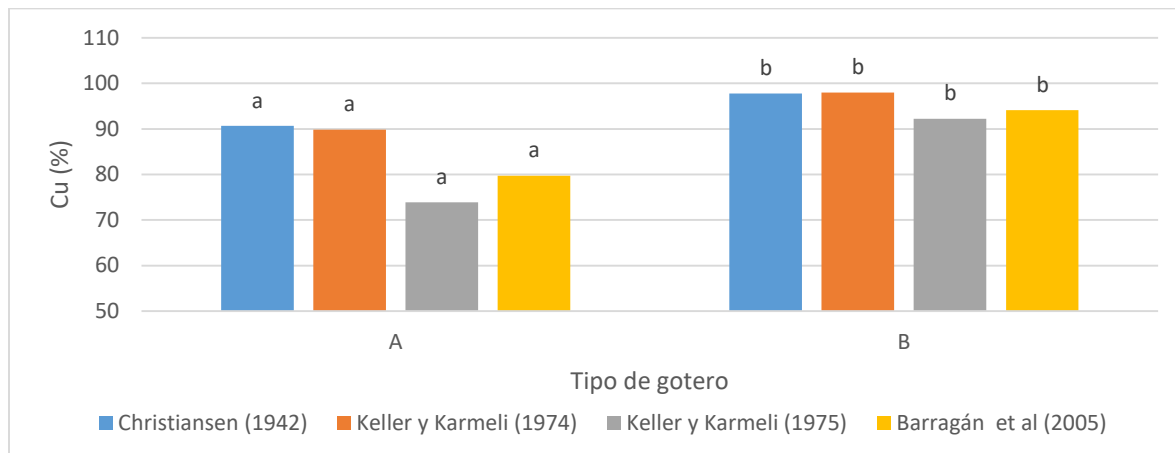


Figura 30. Coeficiente de Uniformidad, según diferentes metodologías para cada tipo de gotero en lateral de 12mm.

En las figuras 29 y 30 se puede afirmar con un nivel de confianza del 95% en la mayoría de metodologías que sí existen diferencias entre los CU de cada tipo de gotero; por otra parte, se observa también que los coeficientes de uniformidad más bajos los presenta el gotero tipo A mientras que los otros dos goteros presentan una alta uniformidad de aplicación.

En la figura 31 se presenta la comparación del Coeficiente de Uniformidad entre cada uno de los diámetros mediante la prueba de múltiples rangos Tukey HSD ($\alpha=0.05$)

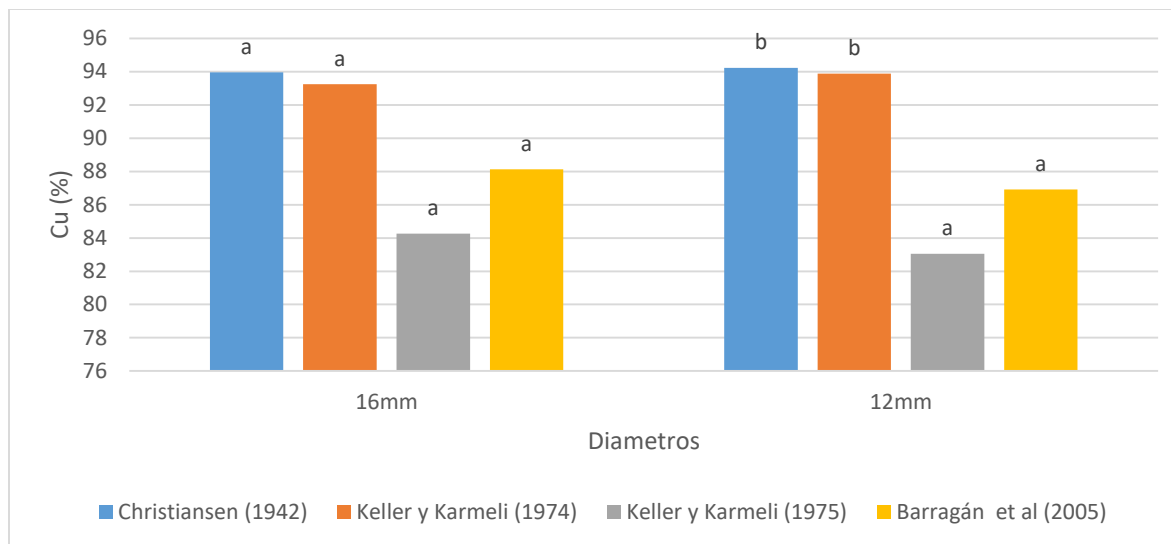


Figura 31. Coeficiente de Uniformidad, según diferentes metodologías para cada tipo de diámetro.

En la figura 31 se puede afirmar con un 95% de confianza que según las dos metodologías que reportan los valores más bajos del CU no existen diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes diámetros; sin embargo, según las dos metodologías restantes, sí presentan diferencias estadísticamente significativas entre los diámetros evaluados.

El comportamiento de las diferentes metodologías descritas anteriormente es muy similar al obtenido por Bedoya y Ángeles (2014) y Bedoya y Ángeles (2016), quienes reportan en sus investigaciones que la metodología que expresa el valor más alto de Coeficiente de Uniformidad es la de Keller y Karmeli (1974), seguida por Barragán et al (2005) y finalmente con el valor más bajo Keller y Karmeli (1975).

En ninguno de los casos el Coeficiente de Uniformidad fue inferior al 70% y ninguno de los coeficientes de variación superó el 30%, lo cual corrobora lo que exponen Barragán, et al. (2005) quienes manifiestan que con $CV < 30\%$, el $CU > 70\%$. Por otra parte, Wu (1997) sostiene que emisores con un CV de 3% a 7% comúnmente presentan un Coeficiente de Uniformidad de 95% – 98% lo cual se cumple ampliamente en los emisores B y C con la mayoría de metodologías. Por otra parte, el gotero tipo A presenta los CU más bajos en toda la prueba, debido a su alto valor CV y según Perea et al (2013), este es un parámetro que influye considerablemente en la uniformidad de aplicación.

Basándose en los resultados del CU obtenidos a partir de la metodología de Christiansen (1942) al incrementar la pendiente de 0% a 3% en el lateral de 16mm se incrementan los valores del CU con todos los tipos de gotero, contrario a los hallazgos de Yildirim (2008) quien en su investigación concluyó que al incrementar el valor de la pendiente cuesta arriba el CU disminuye; por otra parte, al disminuir la pendiente en el mismo lateral de 16 mm en el caso de los goteros A y C se presenta un incremento del CU al disminuir la pendiente de 0% a -1% y una posterior disminución al momento de disminuir la pendiente a -3%, lo cual está acorde con lo reportado por Yildirim (2008). El comportamiento anteriormente descrito puede ser explicado por el

sobredimensionamiento del lateral de riego estudiado ya que es corto para tener un diámetro de 16 mm (Anexo 1).

En el lateral del 12mm el comportamiento del CU es muy similar al obtenido por Yildirim (2008), es decir que al incrementar la pendiente de 0% a 3%, el CU tiende a disminuir, mientras que, si la pendiente se disminuye, inicialmente hay un incremento del CU en la pendiente de -1% y luego este valor tiende a disminuir a medida que se disminuye el valor de la pendiente.

Relacionando el exponente de la ecuación del emisor (x), y el Coeficiente de Variación (CV) de los emisores evaluados con el Coeficiente de Uniformidad (CU), se establece que el CU más alto fue obtenido con los goteros tipo B ($x=0.0548$; $CV=0.025$), seguido por los Goteros tipo C ($x=0.7716$; $CV=0.031$) y por último los goteros tipo A ($x=0.2329$; $CV=0.096$). Los resultados de los emisores tipo C son contrastantes a lo reportado por Smajstrla et al (2015), quienes afirman que valores del exponente de la ecuación del emisor por debajo de 0.5 son relativamente insensibles a los cambios de presión (autocompensado), mientras que valores superiores a 0.5 indican que los emisores tienen cambios más grandes en la descarga cuando las presiones cambian (no autocompensado), pero, el Coeficiente de Variación del emisor tipo C influyó en la uniformidad de aplicación del agua.

De manera general las metodologías propuestas por Christiansen (1942) y Keller y Karmeli (1974) en todos los ensayos arrojaron los resultados más altos del Coeficiente de Uniformidad; en el caso de la primer metodología según Pizarro (1996), a pesar de ser una de las más antiguas, ampliamente difundida y utilizada sobre todo en riego por aspersión, tiende a sobreestimar los valores del CU debido a que bajo esta metodología lo que se está planteando en campo es que la mitad del área regada está recibiendo más de lo necesario, mientras que la otra mitad recibe la cantidad justa de agua, sin embargo, de esta otra mitad, el 25% del terreno recibe menos de la cantidad de agua necesaria, razón por la que otras metodologías utilizadas en riego localizado de alta frecuencia utilizan criterios más exigentes, basándose en el promedio del cuarto inferior de las descargas, es decir el promedio del 25% de las mediciones más bajas, lo cual equivale en campo a que solo el 12,5% del terreno recibe menos del agua necesaria.

La metodología propuesta por Keller y Karmeli (1974) para el cálculo del CU en campo, fue empleada y aceptada por Merriam y Keller (1978) como el valor de la uniformidad de distribución en su documento; además, Merkley y Allen (2004) aclaran que en dicha metodología para $CU > 70\%$ los datos generalmente se ajustan a una distribución normal simétrica sobre el valor medio, por lo que el valor de este modelo se puede considerar como el Coeficiente de Uniformidad. Es importante mencionar que todos los emisores evaluados lograron CU superiores al 70%. Aunque, esta metodología restringe un poco el CU, los resultados logrados en este trabajo fueron similares empleando la metodología de Christiansen (1942), debido a que solo tiene en cuenta factores de diseño hidráulico, pero no factores constructivos.

Por otra parte, las metodologías propuestas por Keller y Karmeli (1975) y Barragán et al (2005) presentan los valores más bajos de los CU, esto se debe a que ambas ecuaciones incluyen en su modelo el cuarto inferior y el CV. Barragán et al (2005), exponen que valores muy bajos de CU darán como resultado un diseño muy conservador y seguro; sin embargo, puede causar un

sobrediseño en sistemas de microirrigación lo cual se verá reflejado en costos, por otro lado, sostienen que la ecuación de su autoría se ajusta muy bien a los valores reales obtenidos en campo.

Finalmente, Keller y Bliesner (1990), manifiestan que un valor ideal del Coeficiente de Uniformidad es relativo, pues éste depende de diferentes factores haciendo complicada su clasificación, sin embargo, según la clasificación de la ASAE (1996) citada por Smajstrla et al (2015), el CU del gotero tipo A se puede clasificar como bueno y los goteros tipo B y tipo C como excelentes según la mayoría de las metodologías evaluadas en esta investigación.

4.7 Pérdidas por fricción, localizadas y totales

La tabla 11 relaciona los códigos o letras asignadas a cada una de las metodologías para el cálculo de pérdidas por fricción. En el caso de las ecuaciones de Darcy – Weisbach, se expresa entre paréntesis la ecuación utilizada para la estimación del factor de fricción f de dicho modelo.

Tabla 11. *Asignación de código a metodologías para el cálculo de pérdidas por fricción.*

Código	Metodología
a	Valor experimental
b	hf Darcy - Weisbach (f-Bagarello) (m)
c	hf Darcy - Weisbach (f-Blasius) (m)
d	hf Darcy - Weisbach (f-Swamee) (m)
e	hf Hazen- Williams (m)

La tabla 12 contiene la información de las pérdidas de presión sin tener en cuenta las pérdidas localizadas en cada tramo para la pendiente de 0%. Para el caso del cálculo de pérdidas por fricción bajo diferentes metodologías, en la tabla 12 se observa claramente que para las diferentes unidades experimentales, la ecuación que predice de manera más aproximada el comportamiento experimental es la ecuación de Darcy – Weisbach (f – Blasius) la cual presenta un error promedio de ajuste que va desde 0.34% hasta 6.38%, de igual manera en todos los casos la ecuación de Darcy – Weisbach con los diferentes factores de fricción presentó un ajuste más cercano al experimental en comparación con la ecuación propuesta por Hazen - Williams. Debido a que el error que se presenta en esta tabla se atribuye a las pérdidas localizadas, así mismo, se puede afirmar que existen mayores pérdidas por fricción en la tubería de 12 mm puesto que allí se presenta el menor ajuste, especialmente en el gotero tipo A; el ajuste más cercano según la mayoría de ecuaciones lo obtuvo el gotero tipo C mientras el ajuste más lejano lo presentó el gotero tipo A.

Tabla 12. Relación de pérdidas por fricción, según diferentes metodologías, en pendiente de 0%.

DISTANCIA	PERDIDAS (m)				% ERROR (E)*				% DE PERDIDA TOTAL				
	0.0	1/3	2/3	1.0	1/3	2/3	1.0	\bar{E}	1/3	2/3	1.0		
PENDIENTE 0%	GOTERO TIPO A-16	a	10.06	9.99	9.95	9.95	0.00	0.00	0.00	0.00	66.67	100.00	100.00
		b	10.06	10.02	10.00	10.00	-0.33	-0.52	-0.49	0.45	66.13	95.06	100.00
		c	10.06	10.02	10.00	10.00	-0.31	-0.48	-0.45	0.41	65.20	94.53	100.00
		d	10.06	10.02	10.00	10.00	-0.31	-0.51	-0.48	0.43	68.55	93.97	100.00
		e	10.06	10.03	10.01	10.01	-0.39	-0.61	-0.58	0.52	66.55	95.08	100.00
	GOTERO TIPO B-16	a	10.02	9.99	9.95	9.95	0.00	0.00	0.00	0.00	50.00	100.00	100.00
		b	10.02	10.00	10.00	10.00	-0.18	-0.46	-0.45	0.36	66.05	95.18	100.00
		c	10.02	10.00	9.99	9.99	-0.17	-0.44	-0.42	0.34	64.70	94.42	100.00
		d	10.02	10.01	10.00	10.00	-0.19	-0.48	-0.46	0.38	64.31	90.73	100.00
		e	10.02	10.01	10.00	10.00	-0.21	-0.50	-0.49	0.40	66.04	94.99	100.00
	GOTERO TIPO C-16	a	10.02	9.99	9.95	9.95	0.00	0.00	0.00	0.00	50.00	100.00	100.00
		b	10.02	10.01	10.00	10.00	-0.19	-0.47	-0.46	0.37	66.36	95.33	100.00
		c	10.02	10.00	10.00	9.99	-0.18	-0.45	-0.44	0.35	65.08	94.62	100.00
		d	10.02	10.01	10.00	10.00	-0.19	-0.49	-0.47	0.38	66.77	91.57	100.00
		e	10.02	10.01	10.00	10.00	-0.22	-0.51	-0.50	0.41	66.42	95.17	100.00
	GOTERO TIPO A-12	a	10.34	9.63	9.42	9.42	0.00	0.00	0.00	0.00	76.92	100.00	100.00
		b	10.34	10.17	10.09	10.08	-5.52	-7.07	-6.93	6.51	65.70	95.09	100.00
		c	10.34	10.16	10.08	10.06	-5.44	-6.93	-6.78	6.38	65.10	94.71	100.00
		d	10.34	10.16	10.08	10.07	-5.43	-6.95	-6.82	6.40	66.19	95.57	100.00
		e	10.34	10.19	10.12	10.11	-5.74	-7.42	-7.31	6.82	66.44	95.26	100.00
	GOTERO TIPO B-12	a	10.16	9.81	9.74	9.74	0.00	0.00	0.00	0.00	83.33	100.00	100.00
		b	10.16	10.09	10.05	10.05	-2.81	-3.20	-3.14	3.05	65.86	95.13	100.00
		c	10.16	10.08	10.04	10.04	-2.76	-3.12	-3.04	2.97	64.83	94.54	100.00
		d	10.16	10.08	10.05	10.05	-2.76	-3.21	-3.13	3.03	68.68	93.30	100.00
		e	10.16	10.10	10.07	10.07	-2.93	-3.38	-3.34	3.22	66.16	95.09	100.00

*Los errores con signo negativo indican que el valor estimado es inferior al experimental.

En la tabla 13 se presentan las pérdidas de presión en cada tramo para la pendiente de 3%. En ella se expone, que la metodología de pérdidas por fricción propuesta por Darcy Weisbach (f – Blasius) en la mayoría de las unidades experimentales se acercó al valor encontrado de manera experimental con errores promedio entre 0.24% y 3.88% . A pesar de, encontrar en tubería de 16 mm en goteros tipo A y C un buen ajuste con la ecuación de Hazen – Williams con errores entre 0.1% y 0.18%.

Tabla 13. Relación de pérdidas por fricción según diferentes metodologías para pendiente de 3%.

DISTANCIA	PÉRDIDAS (m)				% ERROR (E)				% DE PÉRDIDA TOTAL				
	0.0	1/3	2/3	1.0	1/3	2/3	1.0	\bar{E}	1/3	2/3	1.0		
PENDIENTE 3%	GOTERO TIPO A -16	a	10.20	10.09	9.95	9.85	0.00	0.00	0.00	0.00	30.00	70.00	100.00
		b	10.20	10.06	9.95	9.84	0.28	0.06	0.05	0.13	37.45	70.64	100.00
		c	10.20	10.06	9.94	9.84	0.30	0.10	0.10	0.17	37.63	70.84	100.00
		d	10.20	10.06	9.94	9.84	0.30	0.07	0.07	0.15	37.94	70.58	100.00
		e	10.20	10.07	9.95	9.85	0.22	-0.03	-0.04	0.10	36.77	70.01	100.00
	GOTERO TIPO B -16	a	10.20	10.13	9.95	9.86	0.00	0.00	0.00	0.00	20.83	72.92	100.00
		b	10.20	10.08	9.97	9.87	0.43	-0.23	-0.11	0.26	34.75	68.36	100.00
		c	10.20	10.08	9.97	9.87	0.44	-0.21	-0.09	0.24	34.90	68.52	100.00
		d	10.20	10.09	9.98	9.87	0.41	-0.25	-0.13	0.27	34.54	67.92	100.00
		e	10.20	10.09	9.98	9.88	0.40	-0.27	-0.16	0.28	34.32	67.98	100.00
	GOTERO TIPO C -16	a	10.20	10.09	10.02	9.88	0.00	0.00	0.00	0.00	33.33	55.56	100.00
		b	10.20	10.08	9.97	9.87	0.08	0.47	0.10	0.21	34.72	68.32	100.00
		c	10.20	10.08	9.97	9.87	0.09	0.49	0.12	0.23	34.85	68.47	100.00
		d	10.20	10.08	9.98	9.87	0.08	0.45	0.09	0.21	34.82	68.04	100.00
		e	10.20	10.09	9.98	9.88	0.05	0.43	0.05	0.18	34.32	67.97	100.00
	GOTERO TIPO A -12	a	10.48	9.99	9.60	9.42	0.00	0.00	0.00	0.00	46.67	83.33	100.00
		b	10.48	10.21	10.03	9.92	-2.26	-4.51	-5.24	4.00	47.55	79.51	100.00
		c	10.48	10.20	10.02	9.90	-2.18	-4.37	-5.08	3.88	47.72	79.73	100.00
		d	10.48	10.20	10.02	9.91	-2.17	-4.39	-5.13	3.90	48.15	80.02	100.00
		e	10.48	10.23	10.07	9.95	-2.48	-4.87	-5.63	4.32	46.61	78.50	100.00
	GOTERO TIPO B -12	a	10.34	10.09	9.88	9.81	0.00	0.00	0.00	0.00	46.67	86.67	100.00
		b	10.34	10.17	10.03	9.92	-0.74	-1.52	-1.15	1.14	41.35	74.03	100.00
		c	10.34	10.16	10.02	9.91	-0.69	-1.44	-1.06	1.07	41.59	74.32	100.00
		d	10.34	10.16	10.03	9.92	-0.70	-1.52	-1.13	1.12	42.22	73.69	100.00
		e	10.34	10.18	10.05	9.94	-0.85	-1.69	-1.33	1.29	40.34	73.09	100.00

*Los errores con signo negativo indican que el valor estimado es inferior al experimental.

Es importante recordar que las pendiente de -1% y -3% corresponden a uno de los escenarios planteados por Barragan y Wu (2005) y Pizarro (1996), donde en el primer caso la pendiente cuesta abajo gana una cantidad de energía por la altura, que puede recuperar parte de las pérdidas ocasionadas; en dicha situación la presión máxima está en un punto intermedio del lateral o en el segundo caso cuando la altura ganada por la pendiente es mayor que las pérdidas totales generadas en el lateral y la presión máxima se encuentra al final del mismo.

La tabla 14 contiene la información de las pérdidas por fricción en cada tramo para la pendiente de -1%. En ella se observa que en todas las unidades experimentales la ecuación para el cálculo de pérdidas por fricción que mejor se ajustó fue Darcy – Weisbach ($f - \text{Blasius}$) la cual presenta errores promedio de ajuste entre 0.06% a 5.34%, igualmente en todos los casos la

ecuación de Darcy – Weisbach con los diferentes factores de fricción presentó un ajuste más cercano al experimental en comparación con la ecuación propuesta por Hazen - Williams.

Tabla 14. *Relación de pérdidas por fricción según diferentes metodologías, en pendiente de -1%.*

DISTANCIA	PERDIDAS (m)				% ERROR (E)*				% DE PERDIDA/GANANCIA TOTAL**				
	0.0	1/3	2/3	1.0	1/3	2/3	1.0	\bar{E}	1/3	2/3	1.0		
PENDIENTE -1%	GOTERO TIPO A-16	a	9.99	9.97	9.95	9.99	0.00	0.00	0.00	0.00	40.00	100.00	-100.00
		b	9.99	9.98	10.00	10.03	-0.09	-0.48	-0.44	0.34	100.00	-346.54	-958.62
		c	9.99	9.98	10.00	10.03	-0.07	-0.44	-0.40	0.30	100.00	-221.29	-640.11
		d	9.99	9.98	10.00	10.03	-0.07	-0.47	-0.42	0.32	100.00	-261.67	-676.31
		e	9.99	9.99	10.01	10.04	-0.15	-0.57	-0.53	0.41	1.20	39.99	100.00
	GOTERO TIPO B-16	a	9.99	9.99	10.02	10.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.00	100.00
		b	9.99	10.00	10.03	10.06	-0.15	-0.06	-0.04	0.08	20.00	55.73	100.00
		c	9.99	10.00	10.03	10.06	-0.13	-0.04	-0.01	0.06	18.73	54.47	100.00
		d	9.99	10.00	10.03	10.06	-0.16	-0.09	-0.05	0.10	21.60	57.97	100.00
		e	9.99	10.00	10.03	10.07	-0.18	-0.10	-0.08	0.12	22.62	58.02	100.00
	GOTERO TIPO C-16	a	9.99	9.99	10.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00
		b	9.99	10.00	10.03	10.06	-0.16	-0.28	-0.61	0.35	20.67	56.26	100.00
		c	9.99	10.00	10.03	10.06	-0.14	-0.26	-0.58	0.33	19.59	55.18	100.00
		d	9.99	10.00	10.03	10.06	-0.16	-0.30	-0.62	0.36	20.92	57.86	100.00
		e	9.99	10.00	10.03	10.07	-0.18	-0.32	-0.65	0.38	23.02	58.34	100.00
GOTERO TIPO A-12	a	10.27	9.74	9.53	9.49	0.00	0.00	0.00	0.00	68.18	95.45	100.00	
	b	10.27	10.13	10.09	10.11	-4.01	-5.87	-6.49	5.46	86.62	100.00	-11.85	
	c	10.27	10.12	10.08	10.10	-3.93	-5.74	-6.34	5.34	83.87	100.00	-10.13	
	d	10.27	10.12	10.08	10.10	-3.93	-5.75	-6.38	5.35	86.00	100.00	-11.56	
	e	10.27	10.15	10.12	10.14	-4.23	-6.21	-6.85	5.76	93.87	100.00	-15.89	
GOTERO TIPO B-12	a	10.13	9.99	9.95	9.95	0.00	0.00	0.00	0.00	80.00	100.00	100.00	
	b	10.13	10.08	10.08	10.11	-0.96	-1.31	-1.60	1.29	265.77	100.00	-62.52	
	c	10.13	10.08	10.07	10.10	-0.91	-1.23	-1.50	1.21	188.57	100.00	-50.47	
	d	10.13	10.08	10.08	10.11	-0.91	-1.32	-1.58	1.27	267.67	100.00	-58.61	
	e	10.13	10.09	10.10	10.13	-1.08	-1.49	-1.79	1.45	100.00	-17.21	-105.78	

*Los errores con signo negativo indican que el valor estimado es inferior al experimental.

**Los signos negativos en el % de pérdida total indican una disminución de la pérdida inicial o un incremento en la presión.

La tabla 15, ilustra el comportamiento de las pérdidas por fricción con pendiente descendente de -3%; en ella se corrobora que la ecuación de Darcy Weisbach (f – Blasius) expuso el ajuste más cercano en todas las unidades experimentales, presentando un error promedio entre 0.23% y 5.85%.

Tabla 15. Relación de pérdidas por fricción según diferentes metodologías para pendiente de -3%.

DISTANCIA	PERDIDAS (m)				% ERROR (E)				% DE PERDIDA TOTAL				
	0.0	1/3	2/3	1.0	1/3	2/3	1.0	\bar{E}	1/3	2/3	1.0		
PENDIENTE -3%	GOTERO TIPO A-16	a	9.88	9.92	9.99	10.15	0.00	0.00	0.00	0.00	-13.16	-39.47	-100.00
		b	9.88	9.94	10.02	10.12	-0.23	-0.38	0.24	0.29	-23.98	-59.16	-100.00
		c	9.88	9.94	10.02	10.12	-0.21	-0.35	0.28	0.28	-23.46	-58.66	-100.00
		d	9.88	9.94	10.02	10.12	-0.21	-0.38	0.25	0.28	-23.16	-59.20	-100.00
		e	9.88	9.95	10.03	10.13	-0.29	-0.47	0.15	0.30	-25.42	-60.46	-100.00
	GOTERO TIPO B-16	a	9.88	9.99	10.06	10.11	0.00	0.00	0.00	0.00	-45.45	-75.76	-100.00
		b	9.88	9.96	10.05	10.16	0.27	0.03	-0.41	0.24	-28.75	-63.21	-100.00
		c	9.88	9.96	10.05	10.15	0.28	0.05	-0.39	0.24	-28.51	-62.96	-100.00
		d	9.88	9.96	10.06	10.16	0.26	0.00	-0.43	0.23	-29.06	-63.76	-100.00
		e	9.88	9.96	10.06	10.16	0.24	-0.02	-0.46	0.24	-29.34	-63.73	-100.00
	GOTERO TIPO C-16	a	9.88	9.92	10.06	10.13	0.00	0.00	0.00	0.00	-14.29	-71.43	-100.00
		b	9.88	9.96	10.06	10.16	-0.44	0.02	-0.28	0.25	-28.86	-63.31	-100.00
		c	9.88	9.96	10.05	10.15	-0.43	0.04	-0.26	0.24	-28.65	-63.09	-100.00
		d	9.88	9.96	10.06	10.16	-0.45	0.00	-0.29	0.25	-28.86	-63.71	-100.00
		e	9.88	9.96	10.06	10.16	-0.47	-0.02	-0.32	0.27	-29.41	-63.79	-100.00
	GOTERO TIPO A-12	a	10.20	9.63	9.56	9.60	0.00	0.00	0.00	0.00	88.89	100.00	-5.56
		b	10.20	10.13	10.15	10.24	-5.09	-6.14	-6.69	5.97	100.00	-37.52	-160.85
		c	10.20	10.12	10.14	10.23	-5.00	-6.01	-6.53	5.85	100.00	-27.65	-136.48
		d	10.20	10.12	10.14	10.23	-5.00	-6.03	-6.58	5.87	100.00	-30.30	-141.63
		e	10.20	10.15	10.19	10.28	-5.31	-6.49	-7.05	6.28	100.00	-75.78	-255.06
GOTERO TIPO B-12	a	10.02	9.95	9.92	9.99	0.00	0.00	0.00	0.00	66.67	100.00	-66.67	
	b	10.02	10.04	10.11	10.21	-0.91	-1.96	-2.21	1.69	-10.92	-47.92	-100.00	
	c	10.02	10.04	10.10	10.20	-0.86	-1.88	-2.11	1.62	-8.73	-45.84	-100.00	
	d	10.02	10.04	10.11	10.21	-0.87	-1.96	-2.19	1.67	-8.63	-48.49	-100.00	
	e	10.02	10.05	10.13	10.22	-1.03	-2.13	-2.39	1.85	-15.64	-52.12	-100.00	

*Los errores con signo negativo indican que el valor estimado es inferior al experimental.

**Los signos negativos en el % de pérdida/ganancia total indican una disminución de la pérdida inicial o un incremento en la presión.

Basado en los resultados de las tablas 12, 13, 14 y 15, se comprueba que en tubería de 12 mm se presentaron las mayores pérdidas por fricción en todas las pendientes evaluadas cuyo comportamiento también es reportado por Yildirim (2007) y Dalone y Patil (2015). Así mismo, se puede afirmar que la ecuación que describe de manera más aproximada las pérdidas experimentales en los laterales de riego por goteo, es la propuesta por Darcy – Weisbach empleando el factor de fricción (f) de Blasius (1913). Estos resultados son similares a lo publicado por Brown (2003) y Mohamed, Peng y Xu (2014), quienes manifiestan que la ecuación de Darcy – Weisbach es la más empleada en ingeniería por su mayor precisión.

Teniendo en cuenta los resultados experimentales y el principio de parsimonia se propuso una ecuación polinómica de grado 2 para determinar las pérdidas localizadas generadas por los goteros en las diferentes pendientes, la cual fue seleccionada de acuerdo al mayor valor del Coeficiente de Determinación (R^2).

$$h_m = h_f * \left(\frac{A_p}{A_g}\right) * (-0.001617 * X^2 + 0.003442 * X + 0.0003279) \quad (37)$$

Donde:

hm: Pérdidas localizadas (m).

hf: Pérdidas por fricción según ecuación de Darcy Weisbach (f – Blasius) + presión de operación del emisor (m).

Ap: Área transversal del lateral.

Ag: Área libre dentro del tubo.

X: Valor del porcentaje del tramo que se desea evaluar (decimal).

La tabla 16. presenta un resumen del valor de las pérdidas localizadas obtenidas con las diferentes metodologías como factor multiplicador “J” de las pérdidas por fricción, en función de la relación de áreas presentadas por cada uno de los tipos de goteros, cabe mencionar que en esta no se presenta la metodología de Bagarello et. Al (1997).

Tabla 16. *Factor multiplicador de pérdidas localizadas según diferentes metodologías.*

Diámetro de tubería	Tipo de gotero	Relación de áreas	J Bedoya y Ángeles (2017)	J Pizarro (1996)	J Keller y Bliesner (1990)
16 mm	A	1.42	2.38	2.10	2.05
	B	1.31	1.93	1.85	1.80
	C	1.62	3.22	2.15	
12 mm	A	1.87	4.48	2.70	2.85
	B	1.77	3.96	2.35	2.40

En la tabla 16, se aprecia que las pérdidas localizadas son aproximadamente iguales o incluso superiores a las pérdidas por fricción en el lateral con diámetro de 16 mm, empleando las metodologías propuestas Pizarro (1996), Keller y Bliesner (1990), y Bedoya y Ángeles (2017). Por otra parte, con la metodología propuesta por Bedoya y Ángeles (2017), se comprobó en el lateral de 12 mm que las pérdidas localizadas son el doble de las pérdidas por fricción, estos resultados son análogos a los reportados por Yildirim (2010), quien afirma que para goteros en línea la suma de las pérdidas locales pueden llegar a ser dos veces las pérdidas por fricción ocasionadas en la tubería; por otro lado, Yildirim (2010) y Provenzano y Pumo (2004) manifiestan que para goteros en laterales con separación muy reducida (0.20 m) no hay diferencia entre las pérdidas generadas en la tubería con relación a las pérdidas localizadas.

La tabla 17 se encuentra los símbolos o letras asignadas a cada metodología para el cálculo de las pérdidas localizadas.

Tabla 17. *Asignación de código a metodologías para el cálculo de pérdidas localizadas.*

Código	Metodología
a'	Valores experimentales
b'	Keller y Bliesner (1990)
c'	Pizarro (1996)
d'	Bagarello et. Al (1997)
e'	Bedoya y Ángeles (2017)
f'	Metodología Propuesta en este trabajo

Las pérdidas totales se calcularon como la sumatoria de las pérdidas por fricción obtenidas con la ecuación Darcy – Weisbach empleando el factor de fricción (f) de Blasius (1913) más las pérdidas localizadas relacionadas en la tabla 17.

La tabla 18 contiene las pérdidas totales de presión en cada tramo para pendiente de 0%. En esta se observa que las pérdidas localizadas de los emisores empleados no pueden ser descritas por una sola metodología, por ejemplo, los goteros tipo A y C en tubería de 16 mm se ajustaron bien con la ecuación propuesta por Bagarello et. Al (1997), con errores promedio de 0.05% y 0.08% respectivamente, por otro lado, la ecuación que predice de manera más aproximada el comportamiento experimental de las pérdidas totales para el gotero tipo B es la ecuación de Bedoya y Ángeles (2017) con error promedio entre 0.11% y 0.52% en los diámetros de 16 mm y 12 mm respectivamente.

De manera general teniendo en cuenta las diferentes unidades experimentales para la pendiente de 0% la ecuación que mejor se ajustó fue la propuesta por Bedoya y Ángeles (2017) con un error promedio general de 0.69%, seguida por Bagarello et. Al (1997) con un error de 0.75%. No obstante, en esta última expresión Demir et al (2007), afirman que la ecuación se definió dentro del rango de $1.00 < (A_p / A_g) < 1.44$, cuyo parámetro solo se cumple en los goteros A y B instalados en la manguera de 16 mm.

Los mayores ajustes fueron presentados por las ecuaciones más recientes para el cálculo de pérdidas localizadas, basadas en expresiones matemáticas, con excepción de la ecuación propuesta en este trabajo, mientras que los ajustes más bajos fueron dados por las ecuaciones más antiguas que se basan en métodos gráficos para estimar los factores de pérdida por conexión.

De igual forma, en la tabla 18 se demostró con todas las metodologías empleadas que 65% de las pérdidas ocurren en el primer tercio del lateral, mientras que aproximadamente el 5% de las pérdidas ocurren en el tercio final del mismo, cuyo resultado es muy similar al planteamiento realizado por Pizarro (1996) quien manifiesta que para un lateral a nivel en el primer 40% del lateral se presenta el 75% de las pérdidas totales.

Tabla 18. Relación de pérdidas totales, según diferentes metodologías, en pendiente de 0%.

DISTANCIA	PERDIDAS (m)				% ERROR (E)				% DE PERDIDA TOTAL				
	0	1/3	2/3	1.0	1/3	2/3	1.0	\bar{E}	1/3	2/3	1.0		
PENDIENTE 0%	GOTERO TIPO A-16	a'	10.06	9.99	9.95	9.95	0.00	0.00	0.00	0.00	66.67	100.00	100.00
		b'	10.06	9.98	9.94	9.93	0.11	0.13	0.20	0.15	65.20	94.53	100.00
		c'	10.06	9.97	9.94	9.93	0.13	0.16	0.23	0.17	65.20	94.53	100.00
		d'	10.06	9.98	9.95	9.94	0.05	0.02	0.08	0.05	66.69	95.11	100.00
		e'	10.06	9.96	9.92	9.91	0.24	0.32	0.40	0.32	65.20	94.53	100.00
		f'	10.06	10.01	10.01	9.98	-0.24	-0.61	-0.29	0.38	59.90	58.38	100.00
	GOTERO TIPO B-16	a'	10.02	9.99	9.95	9.95	0.00	0.00	0.00	0.00	50.00	100.00	100.00
		b'	10.02	9.99	9.97	9.97	-0.02	-0.22	-0.19	0.14	64.70	94.42	100.00
		c'	10.02	9.99	9.97	9.97	-0.01	-0.21	-0.18	0.13	64.70	94.42	100.00
		d'	10.02	9.99	9.98	9.98	-0.07	-0.30	-0.27	0.21	65.78	94.86	100.00
		e'	10.02	9.99	9.97	9.97	0.00	-0.19	-0.15	0.11	64.70	94.42	100.00
		f'	10.02	9.99	9.99	9.96	-0.05	-0.37	-0.12	0.18	51.47	57.46	100.00
	GOTERO TIPO C-16	a'	10.02	9.99	9.95	9.95	0.00	0.00	0.00	0.00	50.00	100.00	100.00
		c'	10.02	9.98	9.97	9.96	0.02	-0.16	-0.13	0.10	65.08	94.62	100.00
		d'	10.02	9.98	9.96	9.96	0.07	-0.10	-0.07	0.08	66.91	95.34	100.00
		e'	10.02	9.97	9.94	9.94	0.21	0.12	0.16	0.16	65.08	94.62	100.00
		f'	10.02	9.99	9.98	9.95	-0.02	-0.32	-0.02	0.12	48.81	56.72	100.00
		GOTERO TIPO A-12	a'	10.34	9.63	9.42	9.42	0.00	0.00	0.00	0.00	76.92	100.00
	b'		10.34	9.83	9.59	9.55	-1.99	-1.80	-1.36	1.72	65.10	94.71	100.00
	c'		10.34	9.85	9.63	9.59	-2.27	-2.22	-1.80	2.10	65.10	94.71	100.00
	d'		10.34	9.83	9.61	9.58	-2.00	-1.99	-1.63	1.87	67.13	95.51	100.00
	e'		10.34	9.53	9.17	9.10	1.05	2.72	3.41	2.39	65.10	94.71	100.00
	f'		10.34	10.19	10.22	10.14	-5.71	-8.46	-7.63	7.27	78.44	60.17	100.00
	GOTERO TIPO B-12	a'	10.16	9.81	9.74	9.74	0.00	0.00	0.00	0.00	83.33	100.00	100.00
b'		10.16	9.97	9.88	9.86	-1.60	-1.41	-1.24	1.42	64.83	94.54	100.00	
c'		10.16	9.97	9.88	9.87	-1.64	-1.47	-1.31	1.47	64.83	94.54	100.00	
d'		10.16	9.97	9.88	9.87	-1.60	-1.48	-1.33	1.47	66.64	95.26	100.00	
e'		10.16	9.84	9.69	9.67	-0.30	0.49	0.77	0.52	64.83	94.54	100.00	
f'		10.16	10.08	10.09	10.04	-2.76	-3.60	-3.10	3.16	67.44	59.75	100.00	

*Los errores con signo negativo indican que el valor estimado es inferior al experimental.

En la tabla 19 se muestra las pérdidas totales de presión en cada tramo para la pendiente de 3%, en ella es posible observar que la metodología de mejor ajuste en tubería de 16 mm es la propuesta en este trabajo, con errores máximo de 0.46%, pero, en tubería de 12 mm, la mejor metodología fue la de Pizarro (1996) con errores de 0.4% aproximadamente.

Tabla 19. Relación de pérdidas totales según diferentes metodologías para pendiente de 3%.

DISTANCIA	PERDIDAS (m)				% ERROR (E)*				% DE PERDIDA TOTAL				
	0.0	1/3	2/3	1.0	1/3	2/3	1.0	\bar{E}	1/3	2/3	1.0		
PENDIENTE 3%	GOTERO TIPO A -16	a'	10.20	10.09	9.95	9.85	0.00	0.00	0.00	0.00	30.00	70.00	100.00
		b'	10.20	10.02	9.88	9.77	0.72	0.71	0.75	0.72	41.80	74.43	100.00
		c'	10.20	10.02	9.88	9.77	0.74	0.74	0.78	0.75	41.97	74.57	100.00
		d'	10.20	10.03	9.89	9.78	0.66	0.61	0.63	0.63	41.56	74.03	100.00
		e'	10.20	10.01	9.86	9.75	0.85	0.90	0.95	0.90	42.86	75.33	100.00
		f'	10.20	10.06	9.95	9.82	0.36	-0.03	0.26	0.20	37.72	64.42	100.00
	GOTERO TIPO B -16	a'	10.20	10.13	9.95	9.86	0.00	0.00	0.00	0.00	20.83	72.92	100.00
		b'	10.20	10.07	9.95	9.85	0.59	0.01	0.15	0.25	36.87	70.24	100.00
		c'	10.20	10.07	9.95	9.84	0.60	0.03	0.17	0.26	36.99	70.34	100.00
		d'	10.20	10.07	9.96	9.85	0.54	-0.06	0.07	0.22	36.33	69.71	100.00
		e'	10.20	10.07	9.95	9.84	0.61	0.05	0.19	0.28	37.16	70.49	100.00
		f'	10.20	10.07	9.97	9.84	0.55	-0.14	0.21	0.21	35.22	64.61	100.00
	GOTERO TIPO C -16	a'	10.20	10.09	10.02	9.88	0.00	0.00	0.00	0.00	33.33	55.56	100.00
		c'	10.20	10.06	9.94	9.84	0.30	0.80	0.45	0.51	37.57	70.83	100.00
		d'	10.20	10.06	9.94	9.83	0.35	0.86	0.51	0.57	38.36	71.35	100.00
		e'	10.20	10.04	9.91	9.81	0.49	1.08	0.76	0.78	39.70	72.67	100.00
		f'	10.20	10.07	9.96	9.83	0.24	0.61	0.53	0.46	35.24	64.28	100.00
		GOTERO TIPO A -12	a'	10.48	9.99	9.60	9.42	0.00	0.00	0.00	0.00	46.67	83.33
b'	10.48		9.87	9.54	9.39	1.14	0.67	0.34	0.72	55.74	86.74	100.00	
c'	10.48		9.90	9.58	9.43	0.87	0.26	-0.10	0.41	55.38	86.43	100.00	
d'	10.48		9.88	9.56	9.42	1.11	0.45	0.04	0.53	56.94	87.10	100.00	
e'	10.48		9.58	9.11	8.94	4.06	5.11	5.12	4.76	58.39	89.06	100.00	
f'	10.48		10.23	10.16	9.98	-2.44	-5.87	-5.94	4.75	50.27	63.87	100.00	
GOTERO TIPO B -12	a'	10.34	10.09	9.88	9.81	0.00	0.00	0.00	0.00	46.67	86.67	100.00	
	b'	10.34	10.05	9.86	9.74	0.42	0.21	0.70	0.44	48.35	80.18	100.00	
	c'	10.34	10.05	9.87	9.75	0.38	0.15	0.64	0.39	48.18	80.03	100.00	
	d'	10.34	10.05	9.86	9.75	0.42	0.16	0.63	0.41	49.05	80.37	100.00	
	e'	10.34	9.93	9.68	9.55	1.66	2.05	2.66	2.12	52.40	83.69	100.00	
	f'	10.34	10.16	10.07	9.92	-0.70	-1.91	-1.11	1.24	41.97	64.16	100.00	

Finalmente en la tabla 19, se demuestra que, en un lateral de riego con pendiente ascendente, en el primer tercio del lateral se genera entre el 30% y 50% de las pérdidas por fricción. De igual forma, en el segundo tercio del lateral ya se han producido más del 70% de las pérdidas por fricción.

La tabla 20 contiene la información de las pérdidas totales en cada tramo para la pendiente de -1%, así mismo, se observa que para las unidades experimentales evaluadas (Goteros A, B y C) en lateral de 16 mm la ecuación que mejor predice el comportamiento de las pérdidas es la propuesta por Bagarello et. Al (1997), con un error promedio de 0.13% aproximadamente. En el

lateral de diámetro de 12 mm la ecuación más precisa fue la propuesta por Keller y Bliesner (1990) con un error máximo de 0.79%. Analizando las ecuaciones con los tres emisores y diámetros evaluados, se puede decir de forma general que para la pendiente de -1% la ecuación que mejor se ajusta es la propuesta por Bagarello et. al (1997) con un error promedio general de 0.33%, seguida por Keller y Bliesner (1990) con un error de 0.38%, Pizarro (1996) con 0.40%, Bedoya y Ángeles (2017) 1.19% y finalmente la propuesta en este trabajo con un error de 1.59%.

Tabla 20. *Relación de pérdidas totales, según diferentes metodologías, en pendiente de -1%.*

DISTANCIA	PERDIDAS (m)				% ERROR (E)				% DE PERDIDA/GANANCIA TOTAL				
	0	1/3	2/3	1.0	1/3	2/3	1.0	\bar{E}	1/3	2/3	1.0		
PENDIENTE -1%	GOTERO TIPO A -16	a'	9.99	9.97	9.95	9.99	0.00	0.00	0.00	0.00	40.00	100.00	-100.00
		b'	9.99	9.94	9.94	9.96	0.35	0.16	0.24	0.25	95.17	100.00	-53.25
		c'	9.99	9.94	9.93	9.96	0.37	0.19	0.27	0.27	93.78	100.00	-50.12
		d'	9.99	9.94	9.95	9.97	0.29	0.06	0.12	0.16	100.00	-4.55	-71.17
		e'	9.99	9.93	9.92	9.94	0.48	0.35	0.44	0.42	88.11	100.00	-37.41
		f'	9.99	9.97	10.01	10.01	0.00	-0.57	-0.23	0.27	100.00	-251.01	-265.83
	GOTERO TIPO B -16	a'	9.99	9.99	10.02	10.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.00	100.00
		b'	9.99	9.99	10.00	10.03	0.02	0.18	0.22	0.14	-3.32	35.32	100.00
		c'	9.99	9.98	10.00	10.03	0.03	0.19	0.23	0.15	100.00	-717.99	-1945.03
		d'	9.99	9.99	10.01	10.04	-0.03	0.10	0.14	0.09	5.95	43.76	100.00
		e'	9.99	9.98	10.00	10.03	0.04	0.22	0.26	0.17	100.00	129.19	-1224.21
		f'	9.99	9.99	10.02	10.03	-0.02	0.03	0.29	0.10	4.32	78.27	100.00
	GOTERO TIPO C -16	a'	9.99	9.99	10.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00
		c'	9.99	9.98	10.00	10.03	0.06	0.04	-0.27	0.12	100.00	-261.61	-752.56
		d'	9.99	9.98	9.99	10.02	0.11	0.09	-0.21	0.14	100.00	-142.15	-425.84
		e'	9.99	9.96	9.97	10.00	0.25	0.32	0.03	0.20	100.00	-30.01	-144.96
		f'	9.99	9.98	10.01	10.02	0.02	-0.13	-0.17	0.09	100.00	-1693.01	-1956.43
		GOTERO TIPO A -12	a'	10.27	9.74	9.53	9.49	0.00	0.00	0.00	0.00	68.18	95.45
	b'		10.27	9.80	9.60	9.59	-0.58	-0.74	-1.03	0.79	69.67	98.87	100.00
	c'		10.27	9.82	9.64	9.63	-0.86	-1.15	-1.46	1.16	69.98	99.15	100.00
	d'		10.27	9.80	9.62	9.62	-0.59	-0.92	-1.30	0.94	72.18	99.96	100.00
	e'		10.27	9.51	9.18	9.15	2.37	3.66	3.64	3.22	67.74	97.19	100.00
	f'		10.27	10.15	10.22	10.17	-4.19	-7.21	-7.16	6.19	100.00	-56.99	-21.75
	GOTERO TIPO B -12	a'	10.13	9.99	9.95	9.95	0.00	0.00	0.00	0.00	80.00	100.00	100.00
b'		10.13	9.96	9.91	9.92	0.25	0.46	0.28	0.33	74.64	100.00	-7.88	
c'		10.13	9.97	9.91	9.93	0.20	0.40	0.22	0.27	74.81	100.00	-8.26	
d'		10.13	9.96	9.91	9.93	0.24	0.40	0.19	0.28	76.63	100.00	-9.31	
e'		10.13	9.83	9.72	9.73	1.53	2.33	2.27	2.04	71.89	100.00	-1.63	
f'		10.13	10.08	10.12	10.11	-0.92	-1.71	-1.56	1.40	100.00	-88.60	-59.08	

*Los errores con signo negativo indican que el valor estimado es inferior al experimental.

**Los signos negativos en el % de pérdida total indican una disminución de la pérdida inicial o un incremento en la presión.

En el lateral de 16 mm se presentaron ganancias de energía a lo largo de todo el lateral, sin embargo, se observa una pequeña pérdida de presión en el primer tramo de la tubería que es recuperada en el resto del lateral. Finalmente, en todas las unidades experimentales la mayoría de las ecuaciones tienden a sobreestimar los valores de las pérdidas totales, excepto en la unidad del gotero tipo A en manguera de 12 mm en donde sucede lo contrario.

La tabla 21 presenta las pérdidas totales de presión en cada tramo para la pendiente de -3%, en la cual se comprobó que la ecuación de Darcy Weisbach (f - Blasius) sumadas a las pérdidas localizadas determinadas con la ecuación propuesta en este trabajo son las que mejor estiman las pérdidas totales con todos los emisores probados en tubería de 16 mm, alcanzando errores máximos de 0.14%, con los emisores tipo B.

Para la tubería de 12 mm la metodología que logró el mejor comportamiento de las pérdidas menores o localizadas fue la de Keller y Bliesner (1990) siendo ésta la más antigua de las empleadas, con errores promedio de 0.29% y 1.33% para los goteros tipo B y A respectivamente. En estas últimas unidades experimentales, la mayoría de metodologías tienden a subestimar las pérdidas totales en toda la longitud del lateral, excepto la propuesta por Bedoya y Ángeles (2017); además, los errores más altos los presenta la propuesta en este trabajo ajustándose mejor en el gotero tipo B.

Generalizando, el mejor ajuste de las metodologías para la estimación de pérdidas totales en el lateral de riego en pendiente de -3% se registró en las unidades experimentales de la tubería de 16 mm. Por otra parte, la metodología de Bagarello et. al (1997) fue la que mejor estimó las pérdidas totales con un error promedio total de 0.56%, seguida por Keller y Bliesner (1990) con 0.59%, Pizarro (1996) con 0.60%, luego Bedoya y Ángeles (2017) con 1.04% y la propuesta en este trabajo con un error promedio general de 1.74%.

Con los resultados de esta investigación se establece que una sólo ecuación no describe el comportamiento de las pérdidas generadas por la conexión de los tres (3) emisores, en los dos laterales evaluados; debido a que al cambiar la pendiente o diámetro, el comportamiento descrito por las ecuaciones no es el más satisfactorio, no obstante, todas las ecuaciones empleadas hacen una predicción muy cercana a los valores experimentales, haciendo más preciso el diseño de un lateral de riego por goteo.

De igual forma, se pudo constatar que, en promedio en laterales de 16 mm, la ecuación propuesta por Bedoya y Ángeles (2017) logró el mejor comportamiento en la pendiente de 0%, en la pendiente de 3% se destacó Pizarro (1996) y Bagarello et. al (1997) alcanzaron buenos resultados en las pendientes negativas, sin embargo, la ecuación propuesta en esta investigación tuvo un muy buen comportamiento en la predicción de las pérdidas en la tubería de 16 mm, mientras que en los laterales de 12 mm las ecuaciones de Keller y Bliesner (1990) y Pizarro (1996) presentaron un muy buen comportamiento a pesar de ser las más antiguas y de basarse en métodos gráficos.

Por otra parte, es importante destacar que aun cuando la ecuación propuesta en este trabajo no presenta las mejores estimaciones de pérdidas localizadas para todos los escenarios en comparación con las demás metodologías empleadas, si arroja valores muy cercanos con errores

de ajuste inferiores al 4% en la mayoría de las unidades experimentales, excepto en la del gotero tipo A en tubería de 12 mm.

Tabla 21. Relación de pérdidas totales, según diferentes metodologías para pendiente de -3%.

DISTANCIA (m)	PERDIDAS (m)				% ERROR (E)*				% DE PERDIDA/GANANCIA TOTAL**				
	0	1/3	2/3	1.0	1/3	2/3	1.0	\bar{E}	1/3	2/3	1.0		
PENDIENTE -3%	GOTERO TIPO A -16	a'	9.88	9.92	9.99	10.15	0.00	0.00	0.00	0.00	-13.16	-39.47	-100.00
		b'	9.88	9.90	9.96	10.06	0.21	0.26	0.92	0.47	-8.03	-45.39	-100.00
		c'	9.88	9.89	9.96	10.05	0.23	0.29	0.95	0.49	-7.00	-44.50	-100.00
		d'	9.88	9.90	9.97	10.07	0.15	0.16	0.80	0.37	-10.68	-48.10	-100.00
		e'	9.88	9.88	9.94	10.04	0.35	0.46	1.12	0.64	-0.56	-38.97	-100.00
		f'	9.88	9.93	10.03	10.10	-0.15	-0.47	0.44	0.06	-22.27	-68.66	-100.00
	GOTERO TIPO B -16	a'	9.88	9.99	10.06	10.11	0.00	0.00	0.00	0.00	-45.45	-75.76	-100.00
		b'	9.88	9.94	10.03	10.13	0.43	0.27	-0.16	0.29	-25.13	-60.02	-100.00
		c'	9.88	9.94	10.03	10.13	0.44	0.28	-0.14	0.29	-24.90	-59.82	-100.00
		d'	9.88	9.95	10.04	10.14	0.38	0.19	-0.24	0.27	-26.24	-61.07	-100.00
		e'	9.88	9.94	10.03	10.13	0.46	0.30	-0.12	0.29	-24.54	-59.51	-100.00
		f'	9.88	9.95	10.05	10.12	0.40	0.11	-0.09	0.14	-27.24	-68.09	-100.00
	GOTERO TIPO C -16	a'	9.88	9.92	10.06	10.13	0.00	0.00	0.00	0.00	-14.29	-71.43	-100.00
		c'	9.88	9.94	10.02	10.12	-0.22	0.34	0.06	0.21	-23.84	-58.91	-100.00
		d'	9.88	9.93	10.02	10.12	-0.17	0.40	0.11	0.23	-22.36	-57.86	-100.00
		e'	9.88	9.92	9.99	10.09	-0.03	0.62	0.35	0.33	-18.04	-53.86	-100.00
		f'	9.88	9.94	10.04	10.11	-0.27	0.17	0.15	0.02	-26.90	-68.70	-100.00
		GOTERO TIPO A -12	a'	10.20	9.63	9.56	9.60	0.00	0.00	0.00	0.00	88.89	100.00
	b'		10.20	9.79	9.67	9.73	-1.61	-1.05	-1.32	1.33	76.50	100.00	-11.52
	c'		10.20	9.82	9.70	9.77	-1.89	-1.45	-1.74	1.69	77.09	100.00	-12.85
	d'		10.20	9.79	9.68	9.75	-1.64	-1.26	-1.60	1.50	78.95	100.00	-13.39
	e'		10.20	9.50	9.25	9.29	1.38	3.32	3.28	2.66	73.16	100.00	-4.01
	f'		10.20	10.14	10.28	10.30	-5.27	-7.48	-7.34	6.70	100.00	-249.48	-293.50
	GOTERO TIPO B -12	a'	10.02	9.95	9.92	9.99	0.00	0.00	0.00	0.00	66.67	100.00	-66.67
b'		10.02	9.92	9.94	10.02	0.27	-0.22	-0.37	0.29	100.00	-14.22	-102.18	
c'		10.02	9.93	9.94	10.03	0.23	-0.28	-0.44	0.32	100.00	-16.79	-108.91	
d'		10.02	9.92	9.94	10.03	0.28	-0.27	-0.45	0.33	100.00	-19.69	-109.82	
e'		10.02	9.80	9.75	9.83	1.54	1.63	1.57	1.58	83.72	100.00	-28.21	
f'		10.02	10.04	10.15	10.20	-0.87	-2.35	-2.16	1.79	-8.72	-70.38	-100.00	

*Los errores con signo negativo indican que el valor estimado es inferior al experimental.

**Los signos negativos en el % de pérdida/ganancia total indican una disminución de la pérdida inicial o un incremento en la presión.

Asimismo, se pudo determinar que el gotero tipo A insertado en los laterales generó las mayores pérdidas localizadas, ya que, este emisor posee la relación de A_p/A_g , más alta, mientras

que el gotero tipo B fue el emisor que menos pérdidas arrojó, debido al bajo valor de la relación A_p/A_g . Según Provenzano y Pumo (2004) cuanto mayor es la relación de área, más significativo se convierte en la perturbación del flujo principal debido a los emisores.

El emisor tipo C insertado dentro de la tubería (en línea o insertado) presentó menores pérdidas por fricción que el gotero tipo A, este resultado es similar al reportados por Juana, Rodríguez y Losada (2002), quienes concluyeron que las pérdidas de carga para los emisores integrados (tipo C) son menores o iguales a las generadas por los goteros sobre línea, sin embargo, las pérdidas localizadas ocasionadas por el emisor tipo B (sobre línea) son menores a las del tipo C. Este resultado es equivalente al publicado por Howell y Barinas (1980) en su trabajo experimental realizado con seis modelos de emisores diferentes, concluyeron que los emisores en línea tenían pérdidas de presión significativamente mayores que los emisores sobre la línea.

Finalmente, se encontró que los goteros tipo A y B en tubería de 12 mm causaron mayores pérdidas en comparación con la tubería de 16 mm, ya que el área de obstrucción generada por el emisor insertado dentro de la tubería es mayor, en ese sentido AI-Amoud (1995) manifiesta que las pérdidas debidas a la conexión del gotero están en función del diámetro del lateral y del área de la obstrucción de la conexión del gotero, de tal manera que las pérdidas incrementan con el incremento de la obstrucción y la disminución del diámetro de la tubería.

5. Conclusiones

Los emisores deben ser operados dentro del rango de presión recomendado por el fabricante, ya que, por fuera de éste, el rendimiento de los mismos puede disminuir significativamente; así mismo, es necesario establecer las características hidráulicas del emisor, debido a que, algunas veces la información suministrada por el fabricante o vendedores no es confiable.

El Coeficiente de Uniformidad en los emisores evaluados presentó diferencias estadísticamente significativas con un alfa igual a 0.05, llegando a establecer que el gotero que presentó el mejor desempeño hidráulico fue el tipo B seguido por el C y finalmente el A.

Los goteros tipo A y tipo B son autocompensados mientras que el gotero tipo C no lo es; sin embargo, este último gotero posee un buen Coeficiente de Variación inferior al gotero tipo A y ligeramente mayor que el tipo B, por lo tanto, la condición de autocompensado del emisor no es el único parámetro que sirve para establecer una alta eficiencia de aplicación. De igual forma, se comprobó que existe una relación inversa entre el diámetro de la tubería y la descarga de los emisores sobre línea, con diferencias estadísticamente significativas del 95%. ζ

Las pendientes evaluadas no generaron cambios sobre el Coeficiente de Uniformidad en los emisores tipo B y C, con un nivel de confianza del 95%, sin embargo, si se encontraron diferencias significativas entre las pendientes y el Coeficiente de Uniformidad obtenido por el emisor tipo A.

De manera general con las metodologías propuestas por Christiansen (1942) y Keller y Karmeli (1974) se lograron los Coeficientes de Uniformidad más altos; mientras que las metodologías propuestas por Keller y Karmeli (1975) y Barragán et al (2005) alcanzaron los valores más bajos de los Coeficientes de Uniformidad, debido a los parámetros en los que se basan los diferentes modelos, siendo mucho más exigentes las dos últimas ecuaciones.

Analizando el comportamiento de las presiones a lo largo de los laterales de 16 mm y 12 mm de diámetro, se determinó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las pérdidas de presión ocasionadas por los diferentes emisores en cada una de las pendientes, según la prueba de múltiples rangos Tukey HSD ($\alpha=0.05$).

La ecuación propuesta en este trabajo no logró describir exactamente el comportamiento de las pérdidas localizadas, en los escenarios evaluados en comparación con las demás metodologías empleadas, sin embargo, se alcanzaron valores muy cercanos con errores inferiores al 4% en la mayoría de las unidades experimentales, excepto en el lateral de 12 mm.

Los goteros de botón (sobre línea) insertados en la tubería de 16 mm, generan pérdidas localizadas aproximadamente iguales o incluso superiores a las pérdidas por fricción de una tubería lisa; por otra parte, a medida que se disminuye el diámetro, las pérdidas localizadas cobran mayor relevancia incluso llegando a ser dos veces mayores a las pérdidas por fricción.

La ecuación que describió de manera más exacta las pérdidas experimentales, fue la propuesta por Darcy – Weisbach empleando el factor de fricción (f) de Blasius. Adicionalmente se logra establecer que existe una mayor pérdida localizada en el lateral de 12 mm en comparación con el de 16 mm para todas las pendientes evaluadas.

Teniendo en cuenta diferentes escenarios (pendientes y diámetros de tubería), se puede establecer que hasta el momento no existe una ecuación que describa con exactitud el comportamiento de las pérdidas localizadas generadas en un lateral de riego por goteo, debido a que, algunas tienen mayor precisión en determinados escenarios, pero cuando éstos cambian disminuyen su exactitud. Sin embargo, las metodologías empleadas realizan una buena aproximación con errores inferiores al 8%.

6. Referencias

- Abdulrazzaq, K. A., y Jahad, U. A. (2014). Evaluation of uniformity coefficients for sprinkler irrigation system under traditional and looped network field conditions. *Journal of Babylon university/ Engineering sciences Vol. 22*.
- Al-Amoud, A. I. (1995). Significance of energy losses due to emitter connections in trickle irrigation lines. *Journal of Agricultural Engineering Research*.
- Ángeles M, V., Arteaga R, R., Vásquez P, M. A., Carrillo G, M., y Ibáñez C, L. A. (2007). Factores de ajuste para la pérdida de carga por fricción en tuberías con salidas múltiples telescópicas o con servicio mixto. *Ingeniería del agua*, 293 - 305.
- Bagarello, V., Ferro, V., Provenzano, G., y Pumo, D. (1997). Evaluating pressure losses in drip-irrigation lines . *Journal of irrigation and drainage engineering* , 1 - 7.
- Barragán, J., y Wu, I. P. (2005). Simple Pressure Parameters for Micro-irrigation Design. *Biosystems Engineering*, 463 – 475.
- Barragán, j., Bralts, V., y Wu, I. P. (2005). Assessment of Emission Uniformity for Micro - Irrigation Desing. *Biosystems Engineering*, 89 - 97.
- Bedoya C, M., y Ángeles M, V. (2014). ¿Es posible mejorar la uniformidad de riego utilizando diferentes espaciamientos entre emisores? *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. V, núm. 6., 169-175.
- Bedoya C, M., y Ángeles M, V. (2016). Estrategias para estimar el coeficiente de uniformidad en laterales de riego. *Revista ingeniería y región*, 65 - 71.
- Bedoya C, M., y Ángeles M, V. (2017). Comparación de métodos para estimar pérdidas localizadas en riego por goteo. *Tecnología y Ciencias del agua*, vol. VIII, 117 - 125.
- Bonifacio M, O. E. (2014). *Diseño Hidráulico de un sistema de riego por goteo en espárrago (Ica)*. LIMA – PERÚ: UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS.
- Brown, G. O. (2003). The history of the Darcy - Weisbach equation for pipe flow resistance. *Environmental and water resources history*, 34 - 43.
- Camp, C. R., Sadler , E. J. y Bussher, W. J. (1997). Acomparision of uniformity measures for drip irrigation systems. *Soil y water div. of ASAE*, 1013 - 1020.
- China, R. R., y Dominguez , A. (2006). Total friction loss along multiple outlets pipes with open end . *Journal of irrigation and drainage engineering vol. 132*, 31 - 40.
- Christiansen, J. E. (1942). *Irrigation by Sprinkling*. Berkley, California: University of California.
- Dalone, A. S., y Patil, B. M. (2015). Evaluation of local head loss for non pressure compensating online emitters and pressure compensating inline emitters in drip irrigation laterals. *International journal of emerging research in management & technology* , 9 - 16.

- Demir, V., Yurdem, H., y Degirmencioglu, A. (2007). Development of prediction models for friction losses in drip irrigation laterals equipped with integrated in-line and on-line emitters using dimensional analysis. *Biosystems Engineering*, 617 - 631.
- Detar, W. R. (1982). Modified graphical determination of submain size. *Transactions of ASAE*, 695 - 696.
- FAO, O. d. (2011). *El estado de la inseguridad alimentaria en el mundo*. Roma: FAO.
- Farrás, L. E. (2013). *Breve historia de la ecuación de Darcy - Weisbach (Fanning) y consideraciones de interés sobre la misma*. Buenos Aires: Instituto de ingeniería sanitaria y ambiental.
- Fernández G, R., Ávila A, R., López R, M., Gavilán Z, P., y Oyonarte G, N. A. (2010). *Manual de Riego para Agricultores Manual de Riego para Agricultores, módulo 1: Fundamentos del riego*. Sevilla: Signatura Ediciones de Andalucía, S.L.
- Fernández G, R., Yruela M, M., Milla M, M., García B, J. P., Ávila A, R., Gavilán Za, P., y Oyonarte G, N. A. (2010). *Manual de riego para agricultores Módulo 4: Riego Localizado*. Andalucía: Ediciones Ilustres S.L. (Córdoba).
- Franquet B, J. M. (2003). *El plan Hidrológico y los trasvases; cinco temas de hidrología e hidráulica*. Cataluña: Universidad Internacional de Cataluña.
- Hall, A. W. (1999). Priorities for irrigated agriculture. *Agricultural Water Management* 40. 25-29.
- Howell, T. A., y Barinas, F. A. (1980). Pressure losses across trickle irrigation fittings and emitters. *Transactions of the ASAE*, 928 - 933.
- Juana, L., Rodríguez S, L., y Losada, A. (2002). Determining minor head losses in drip irrigation laterals. I: methodology. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 376 - 384.
- Kang, Y., y Nishiyama, S. (1996). Analysis of microirrigation systems using a lateral discharge equation. *American Society of Agricultural Engineers*, 921 - 929.
- Keller, J., y Bliesner, R. D. (1990). *Sprinkle and trickle irrigation*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Keller, J., y Karmeli, D. (1974). Trickle irrigation design parameters. *ASAE*, 678 - 684.
- Liotta, M., Carrión, R., Ciancaglini, N., y Olgún, A. (2015). *Riego por goteo*. UCAR Unidad de Cambio Rural.
- Loba, J., Ramírez, S., y Díaz, J. E. (2011). Evaluación del coeficiente de uniformidad en cuatro emisores de riego usando filtración gruesa de flujo ascendente en capas. *EIA*, 29 - 41.
- Martínez C., M. (1993). *Hidráulica aplicada a proyectos de riego*. Murcia: Universidad de Murcia.
- Martínez E., R. (1991). *RIEGO LOCALIZADO: DISEÑO Y EVALUACIÓN*. México: Universidad Autónoma Chapingo.

- Merkley, G. P., y Allen, R. G. (2004). *Sprinkle & trickle irrigation Lecture Notes*. Logan, Utah: Biological and Irrigation Engineering Department, Utah State University .
- Merriam, J. L., y Keller, J. (1978). *Farm irrigation system evaluation: A guide for management*. Logan, Utah: Utah state university.
- Moazed, H., Bavi, A., Boroomand-Nasab, S., Naseri, A., y Albaji, M. (2010). Effects of climatic and hydraulics parameters on water uniformity coefficient in solid set systems. *Journal of applied sciences* , 1 - 5.
- Mohamed, K. S., Peng , S. Z., y Xu, J.-Z. (2014). Hydraulic model of trickle irrigation laterals with single and varying pipe size. *International conference on geological and civil engineering* , 70 - 78.
- Perea, H., Enciso, J., y Singh, V. P. (2013). Statistical analysis of non-pressure-compensating and pressure-compensating drip emitters. *Journal of irrigation and drainage engineering* , 986 - 994.
- Pizarro, F. (1996). *Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF) goteo, microaspersión, exudación*. Madrid - Barcelona - Mexico: Mundi prensa.
- Provenzano, G., y Pumo, D. (2004). Experimental analysis of local pressure losses for microirrigation laterals. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 318 - 324.
- Rodríguez G, M. R., y Puig E, O. (2012). Comportamiento hidráulico de los sistemas de riego por goteo superficial y subsuperficial. *Revista de ciencias técnicas agropecuarias*, 23 - 28.
- Rodríguez S, L., Juana S, L., Sánchez C, R., y Losada V, A. (2004). Pérdidas de carga localizadas en inserciones de ramales de goteo. *Ingeniería del agua vol. 11*, 289 - 296.
- Saldarriaga V., J. (1998). *Hidráulica de Tuberías*. Bogotá, D. C., Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S. A.
- Scaloppi, E. J. (1988). Adjusted F factor for multiple - outlet pipes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136 - 137.
- Smajstrla, A. G., Boman, B. J., Haman, D. Z., Pitts, D. J., y Zazueta, F. S. (2015). Field evaluation of microirrigation water application uniformity . *IFAS Extension* , 1 - 8.
- Turégano P, J. V. (2014). Modelización del comportamiento hidráulico de una subunidad de riego localizado. *Universidad Politécnica de València*, 23-30.
- Vélez S, J. E., Camacho T, J. H., y Álvarez H, J. G. (2013). Evaluación de goteros utilizados en microirrigación en Colombia . *Revista colombiana de ciencias Hortícolas*, 186 - 200.
- Wu, I.-P. (1997). An assessment of hydraulics design of micro-irrigation systems . *Agricultural water management* , 275 - 284.
- Yildirim, G. (2007). An assessment of hydraulic design of trickle laterals considering effect of minor losses. *Irrigation and drainage* , 399-421.

- Yildirim, G. (2008). Determining operating inlet pressure head incorporating uniformity parameters for multioutlet plastic pipelines. *Journal of irrigation and drainage engineering* , 341 - 348.
- Yildirim, G. (2010). Total energy loss assessment for trickle lateral lines equipped with integrated in-line and on-line emitters . *Irrigation Science* , 341 - 352.
- Yıldırım, G., y Agiralıoğlu, N. (2004). Comparative Analysis of Hydraulic Calculation Methods in Design of Microirrigation Laterals. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 201 - 217.
- Zúñiga M., E. (2004). *Diseño y evaluación del riego a presión*. San José, Costa Rica: Editorial de la universidad de Costa Rica.

ANEXOS

ANEXO 1. Tablas de cálculos para el diseño del lateral de goteo de 16mm con cada tipo de gotero.

Diámetro de tubería 13,6 mm – Gotero tipo A – 16mm						
Pendiente	J	J'	hfL	hL (m)	hn (m)	ΔH (m)
3	0.125	0.219	0.082	10.211	9,830	0.382
0	0.125	0.219	0.082	10.061	9,980	0.082
-3	0.125	0.219	0.082	9,911	10.130	-0.218
-1	0.125	0.219	0.082	10.011	10.030	-0.018
Diámetro de tubería 13,6 mm – Gotero tipo B – 16mm						
Pendiente	J	J'	hfL	hL (m)	hn (m)	ΔH (m)
3	0.062	0.108	0.040	10.180	9,840	0.340
0	0.062	0.108	0.040	10.030	9,990	0.040
-3	0.062	0.108	0.040	9,880	10.140	-0.260
-1	0.062	0.108	0.040	9,980	10.040	-0.060
Diámetro de tubería 13,6 mm – Gotero tipo C – 16mm						
Pendiente	J	J'	hfL	hL (m)	hn (m)	ΔH (m)
3	0.062	0.108	0.040	10.180	9,840	0.340
0	0.062	0.108	0.040	10.030	9,990	0.040
-3	0.062	0.108	0.040	9,880	10.140	-0.260
-1	0.062	0.108	0.040	9,980	10.040	-0.060
Diámetro de tubería 9,55 mm - Gotero tipo A – 12mm						
Pendiente	J	J'	hfL	hL (m)	hn (m)	ΔH (m)
3	0.671	1,174	0.439	10.479	9,740	0.739
0	0.671	1,174	0.439	10.329	9,890	0.439
-3	0.671	1,174	0.439	10.179	10.040	0.139
-1	0.671	1,174	0.439	10.279	9,940	0.339
Diámetro de tubería 9,55 mm – Gotero tipo B – 12mm						
Pendiente	J	J'	hfL	hL (m)	hn (m)	ΔH (m)
3	0.330	0.578	0.216	10.312	9,796	0.516
0	0.330	0.578	0.216	10.162	9,946	0.216
-3	0.330	0.578	0.216	10.012	10.096	-0.084
-1	0.330	0.578	0.216	10.112	9,996	0.116

J: Pérdidas por fricción; *J'*: Pérdidas por conexión + Pérdidas tubería simple; *hfL*: Pérdidas de carga tubería múltiple; *hL*: Presión a la entrada del lateral; *hn*: Presión mínima en el lateral; ΔH : Diferencia de presión de entrada y presión mínima.

ANEXO 2. Tabla de ecuación característica determinada experimentalmente para cada tipo de gotero.

Ecuación característica del emisor		
Gotero tipo A		R²
Emisor 1	$q = 2,8902h^{0.058}$	0.8111
Emisor 2	$q = 3,1556h^{0.2602}$	0.9588
Emisor 3	$q = 3,2113h^{0.281}$	0.9510
Emisor 4	$q = 2,9661h^{0.3027}$	0.9526
Emisor 5	$q = 3,0474h^{0.2734}$	0.9280
Ecu. Promedio	$q = 3,0555h^{0.2329}$	0.9641
Gotero tipo B		R²
Emisor 1	$q = 1,9884h^{0.0165}$	0.041
Emisor 2	$q = 2,0695h^{0.0545}$	0.757
Emisor 3	$q = 2,0569h^{0.0492}$	0.776
Emisor 4	$q = 2,0914h^{0.0534}$	0.819
Emisor 5	$q = 2,0435h^{0.0619}$	0.933
Ecu. Promedio	$q = 2,0654h^{0.0548}$	0.863
Gotero tipo C		R²
Emisor 1	$q = 1,8990h^{0.7415}$	0.965
Emisor 2	$q = 1,8013h^{0.7666}$	0.961
Emisor 3	$q = 1,7292h^{0.7757}$	0.963
Emisor 4	$q = 1,7206h^{0.8021}$	0.956
Emisor 5	$q = 1,7292h^{0.7757}$	0.963
Ecu. Promedio	$q = 1,7763h^{0.7716}$	0.962

ANEXO 3. Tabla de ANOVA (simple) para caudal de cada tipo de gotero en los dos diámetros por pendiente.

Gotero tipo A – 16mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.423783	4	0.105946	1,29	0.2758
Intra grupos	20.174	245	0.0823427		
Total (Corr.)	20.5977	249			
Gotero tipo B – 16mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.0217405	3	0.00724685	4	0.0086
Intra grupos	0.355218	196	0.00181234		
Total (Corr.)	0.376958	199			
Gotero tipo C – 16mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.144539	3	0.0481798	12,32	0.0000
Intra grupos	0.766191	196	0.00390914		
Total (Corr.)	0.91073	199			
Gotero tipo A – 12mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.0542087	3	0.0180696	0.24	0.8712
Intra grupos	15,0079	196	0.0765708		
Total (Corr.)	15,0621	199			
Gotero tipo B – 12mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.00613702	3	0.00204567	1,49	0.2182
Intra grupos	0.268889	196	0.00137188		
Total (Corr.)	0.275026	199			

ANEXO 4. Tabla de ANOVA (multifactorial) para caudal de cada tipo de gotero.

Gotero tipo A					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:PENDIENTES	0.0581795	3	0.0193932	0.24	0.8697
B:DIAMETROS	0.643124	1	0.643124	7,9	0.0052
INTERACCIONES					
AB	0.0374921	3	0.0124974	0.15	0.9274
RESIDUOS	31,9171	392	0.0814212		
TOTAL (CORREGIDO)	32,6559	399			
Gotero tipo B					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:PENDIENTES	0.00932756	3	0.00310919	1,95	0.1206
B:DIAMETROS	0.0684346	1	0.0684346	42,98	0.0000
INTERACCIONES					
AB	0.01855	3	0.00618333	3,88	0.0093
RESIDUOS	0.624107	392	0.00159211		
TOTAL (CORREGIDO)	0.720419	399			

ANEXO 5. Tabla de ANOVA (simple) para presión por tipo de gotero – 16mm en cada pendiente.

Pendiente de -3%					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.00281667	2	0.00140833	0.06	0.9462
Intra grupos	0.22785	9	0.0253167		
Total (Corr.)	0.230667	11			
Pendiente de -1%					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.00605	2	0.003025	3,04	0.0979
Intra grupos	0.00895	9	0.000994444		
Total (Corr.)	0.015	11			
Pendiente de 0%					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.000416667	2	0.000208333	0.07	0.9373
Intra grupos	0.02875	9	0.00319444		
Total (Corr.)	0.0291667	11			
Pendiente de 3%					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.00281667	2	0.00140833	0.03	0.9688
Intra grupos	0.39855	9	0.0442833		
Total (Corr.)	0.401367	11			

ANEXO 6. Tabla de ANOVA (simple) para presión por tipo de gotero – 12mm en cada pendiente.

Pendiente de -3%					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.195312	1	0.195312	2,09	0.1979
Intra grupos	0.559375	6	0.0932292		
Total (Corr.)	0.754688	7			
Pendiente de -1%					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.245	1	0.245	1,8	0.2278
Intra grupos	0.815	6	0.135833		
Total (Corr.)	1,06	7			
Pendiente de 0%					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.10125	1	0.10125	0.44	0.5327
Intra grupos	1,3875	6	0.23125		
Total (Corr.)	1,48875	7			
Pendiente de 3%					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.10125	1	0.10125	0.36	0.5684
Intra grupos	1,66875	6	0.278125		
Total (Corr.)	1,77	7			

ANEXO 7. Tabla ANOVA (simple) para CU Christiansen (1942) de cada tipo de gotero en los dos diámetros por pendiente.

Gotero tipo A – 16mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1,02131	4	0.255327	4,07	0.0327
Intra grupos	0.627157	10	0.0627157		
Total (Corr.)	1,64846	14			
Gotero tipo B – 16mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.835995	3	0.278665	5,19	0.0278
Intra grupos	0.429261	8	0.0536576		
Total (Corr.)	1,26526	11			
Gotero tipo C – 16mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.278461	3	0.0928204	2,47	0.1363
Intra grupos	0.300606	8	0.0375757		
Total (Corr.)	0.579067	11			
Gotero tipo A – 12mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.883498	3	0.294499	0.88	0.4891
Intra grupos	2,66358	8	0.332947		
Total (Corr.)	3,54708	11			
Gotero tipo B – 12mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1,25426	3	0.418085	2,48	0.1352
Intra grupos	1,34744	8	0.16843		
Total (Corr.)	2,6017	11			

ANEXO 8. Tabla ANOVA (multifactorial) para CU Christiansen (1942).

Diámetro de 16mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:TIPO GOTERO	368,832	2	184,416	3638,46	0.0000
B:PENDIENTES	0.331677	3	0.110559	2,18	0.1164
INTERACCIONES					
AB	1,79442	6	0.299071	5,9	0.0007
RESIDUOS	1,21644	24	0.0506852		
TOTAL (CORREGIDO)	372,174	35			
Diámetro de 12mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:TIPO GOTERO	306,929	1	306,929	1224,34	0
B:PENDIENTES	1,20522	3	0.40174	1,6	0.2281
INTERACCIONES					
AB	0.932533	3	0.310844	1,24	0.328
RESIDUOS	4,01102	16	0.250689		
TOTAL (CORREGIDO)	313,077	23			

ANEXO 9. Tabla ANOVA (simple) para CU Keller y Karmeli (1975) de cada tipo de gotero en los dos diámetros por pendiente.

Gotero tipo A – 16mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	23,5814	4	5,89535	4,92	0.0187
Intra grupos	11,9825	10	1,19825		
Total (Corr.)	35,564	14			
Gotero tipo B – 16mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,434739	3	0,144913	1,36	0,3215
Intra grupos	0,84994	8	0,106242		
Total (Corr.)	1,28468	11			
Gotero tipo C – 16mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	5,38709	3	1,7957	0,54	0,6701
Intra grupos	26,7672	8	3,3459		
Total (Corr.)	32,1543	11			
Gotero tipo A – 12mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	85,3454	3	28,4485	0,85	0,5037
Intra grupos	267,147	8	33,3934		
Total (Corr.)	352,492	11			
Gotero tipo B – 12mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	5,81843	3	1,93948	1,02	0,4328
Intra grupos	15,1912	8	1,8989		
Total (Corr.)	21,0097	11			

ANEXO 10. Tabla ANOVA (multifactorial) para CU Keller y Karmeli (1975).

Diámetro de 16mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:TIPOS DE GOTERO	2454,07	2	1227,04	744,38	0
B:PENDIENTES	10.5742	3	3,52472	2,14	0.1218
INTERACCIONES					
AB	18,5706	6	3,0951	1,88	0.1263
RESIDUOS	39,5617	24	1,6484		
TOTAL (CORREGIDO)	2522,78	35			
Diámetro de 12mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:TIPOS DE GOTERO	2020.26	1	2020.26	114,49	0
B:PENDIENTES	52,6739	3	17,558	1	0.4204
INTERACCIONES					
AB	38,49	3	12,83	0.73	0.5506
RESIDUOS	282,338	16	17,6461		
TOTAL (CORREGIDO)	2393,76	23			

ANEXO 11. Tabla ANOVA (simple) para CU Merriam y Keller (1978) de cada tipo de gotero en los dos diámetros por pendiente.

Gotero tipo A – 16mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1,843	4	0.460751	4,64	0.0224
Intra grupos	0.992882	10	0.0992882		
Total (Corr.)	2,83588	14			
Gotero tipo B – 16mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.689219	3	0.22974	0.59	0.6403
Intra grupos	3,13007	8	0.391259		
Total (Corr.)	3,81929	11			
Gotero tipo C -16mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1,84921	3	0.616402	10.7	0.0036
Intra grupos	0.460946	8	0.0576182		
Total (Corr.)	2,31015	11			
Gotero tipo A – 12mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1,52464	3	0.508215	1,06	0.4176
Intra grupos	3,82938	8	0.478673		
Total (Corr.)	5,35403	11			
Gotero tipo B – 12mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	5,30735	3	1,76912	5,58	0.0231
Intra grupos	2,5347	8	0.316838		
Total (Corr.)	7,84205	11			

ANEXO 12. Tabla ANOVA (multifactorial) para CU Merriam y Keller (1978).

Diámetro de 16mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:TIPO DE GOTERO	421,082	2	210.541	1107,92	0
B:PENDIENTES	3,17207	3	1,05736	5,56	0.0048
INTERACCIONES					
AB	1,18113	6	0.196854	1,04	0.4269
RESIDUOS	4,56079	24	0.190033		
TOTAL (CORREGIDO)	429,996	35			
Diámetro de 12mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:TIPO DE GOTERO	397,6	1	397,6	999,61	0
B:PENDIENTES	2,11249	3	0.704164	1,77	0.1933
INTERACCIONES					
AB	4,7195	3	1,57317	3,96	0.0276
RESIDUOS	6,36409	16	0.397755		
TOTAL (CORREGIDO)	410.796	23			

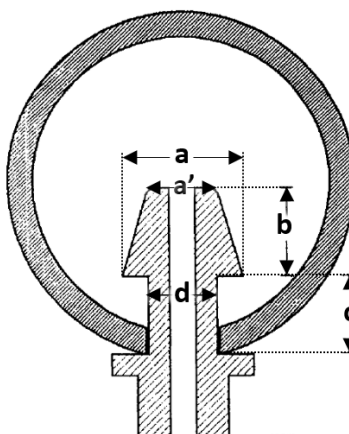
ANEXO 13. Tabla ANOVA (simple) para CU Barragán (2005) de cada tipo de gotero en los dos diámetros por pendiente.

Gotero tipo A – 16mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	17,3063	4	4,32657	4,72	0.0212
Intra grupos	9,16634	10	0.916634		
Total (Corr.)	26,4726	14			
Gotero tipo B – 16mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.360858	3	0.120286	2,01	0.1913
Intra grupos	0.478907	8	0.0598634		
Total (Corr.)	0.839765	11			
Gotero tipo C – 16mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	3,03468	3	1,01156	0.46	0.7147
Intra grupos	17,4067	8	2,17584		
Total (Corr.)	20.4414	11			
Gotero tipo A – 12mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	67,7824	3	22,5941	0.78	0.5372
Intra grupos	231,583	8	28,9479		
Total (Corr.)	299,365	11			
Gotero tipo B – 12mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	4,80981	3	1,60327	0.92	0.4754
Intra grupos	13,9985	8	1,74981		
Total (Corr.)	18,8083	11			

ANEXO 14. Tabla ANOVA (multifactorial) para CU Barragán (2005).

Diámetro de 16mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:TIPOS DE GOTERO	1471,32	2	735,658	653,81	0
B:PENDIENTES	7,06249	3	2,35416	2,09	0.1278
INTERACCIONES					
AB	13,4924	6	2,24873	2	0.1056
RESIDUOS	27,0046	24	1,12519		
TOTAL (CORREGIDO)	1518,88	35			
Diámetro de 12mm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:TIPOS DE GOTERO	1238,35	1	1238,35	80.68	0
B:PENDIENTES	42,8268	3	14,2756	0.93	0.4489
INTERACCIONES					
AB	29,7654	3	9,92179	0.65	0.5965
RESIDUOS	245,581	16	15,3488		
TOTAL (CORREGIDO)	1556,52	23			

ANEXO 15. Dimensiones de los tipos de gotero.





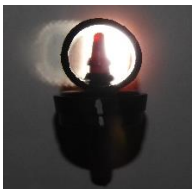

Dimensiones (mm)					
	a	a'	b	c	d
	5,78	4,06	7,73	5,40	4,77
Gotero tipo	5,77	3,83	7,79	5,12	4,76
A	5,71	3,72	7,80	5,36	4,88
	5,72	4,05	7,24	5,28	4,77
Promedio	5,75	3,92	7,64	5,29	4,80
	5,51	3,40	4,74	3,27	4,24
Gotero tipo	5,48	3,31	4,91	3,35	4,24
B	5,56	3,30	4,70	3,42	4,25
	5,40	3,46	4,82	3,46	4,24
Promedio	5,49	3,37	4,79	3,38	4,24

Gotero tipo C		
Dimensiones (mm)		
	Diámetro externo	Diámetro interno
	17,19	11,13
Gotero tipo	16,94	11,09
C	17,03	11,16
	17,18	11,08
Promedio	17,09	11,12

ANEXO 16. Relación de áreas del sistema tubería – gotero empleados en el estudio.

El área de la tubería (A_p) y el área libre dentro de la tubería (A_g), empleadas en la determinación de las pérdidas localizadas, se estimaron mediante el software *AutoCAD 2017*, con el cual se realizó la digitalización de tres fotografías tomadas al sistema tubería-gotero, como se aprecia en la siguiente figura.



Gotero – Diámetro de tubería	A_p	A_g	Relación de áreas (R_a)	Promedio R_a	
Tipo A - 16mm		162,7923	114,5455	1,4212	1,42
		196,0314	140,3124	1,3971	
		164,6451	113,3088	1,4531	
Tipo B - 16mm		158,0551	119,9378	1,3178	



170.9354	132,1168	1,2938	1,31
----------	----------	--------	------



155,4937	118,7858	1,3090	
----------	----------	--------	--

Tipo C - 16mm



161,4392	99,3525	1,6249	
----------	---------	--------	--



182,5851	113,2073	1,6128	1,62
----------	----------	--------	------



190.3492	117,6428	1,6180	
----------	----------	--------	--

Tipo A -12mm



91,9955	50.1125	1,8358	
---------	---------	--------	--



83,5779	43,4331	1,9243	1,87
---------	---------	--------	------



90.9296	49,2014	1,8481	
---------	---------	--------	--

Tipo B - 12mm



78,4223 44,4295 1,7651



78,3531 43,9388 1,7832 1,77



79,8850 45,3248 1,7625

ANEXO 17. Tabla de comportamiento del CU evaluado con diferentes metodologías para cada uno de los tratamientos.

GOTERO DIAMETRO	METODOLOGIA	PENDIENTES			
		3%	0%	-1%	-3%
A 16mm	Christiansen (1942)	90.26 ± 0.31 ab	90.17 ± 0.29 a	90.57 ± 0.23 b	90.38 ± 0.08 ab
	Keller y Karmeli (1974)	89,9 ± 0.3 a	89,02 ± 0.23 a	89,51 ± 0.56 b	89,67 ± 0.16 ab
	Keller y Karmeli (1975)	76,49 ± 1,32 a	72,96 ± 0.64 a	74,83 ± 0.98 b	74,73 ± 1,7 ab
	Barragán et al (2005)	82,27 ± 1,08 a	79,21 ± 0.55 a	80.81 ± 0.87 b	80.76 ± 1,53 ab
B 16mm	Christiansen (1942)	98,13 ± 0.29 a	97,42 ± 0.21 b	97,89 ± 0.08 ab	97,96 ± 0.28 ab
	Keller y Karmeli (1974)	97,38 ± 1,02 a	97,24 ± 0.26 a	97,13 ± 0.55 a	96,93 ± 0.4 a
	Keller y Karmeli (1975)	93,56 ± 0.04 a	94,05 ± 0.4 a	94,15 ± 0.45 a	93,92 ± 0.24 a
	Barragán et al (2005)	95,2 ± 0.08 a	95,72 ± 0.29 a	95,78 ± 0.33 a	95,58 ± 0.2 a
C 16mm	Christiansen (1942)	97,39 ± 0.06 a	97,21 ± 0.24 a	97 ± 0.22 a	96,94 ± 0.2 a
	Keller y Karmeli (1974)	96,76 ± 0.23 a	97,2 ± 0.13 a	96,66 ± 0.34 ab	96,1 ± 0.22 b
	Keller y Karmeli (1975)	91,44 ± 0.4 a	92,83 ± 1,59 a	91,72 ± 2,56 a	91,01 ± 2,04 a
	Barragán et al (2005)	93,64 ± 0.36 a	94,84 ± 1,21 a	93,99 ± 2,02 a	93,42 ± 1,74 a
A 12mm	Christiansen (1942)	91,11 ± 0.07 a	91,13 ± 0.33 a	91,25 ± 0.72 a	91,06 ± 0.83 a
	Keller y Karmeli (1974)	90,42 ± 0.2 a	90,06 ± 0.66 a	90,75 ± 0.85 a	90,92 ± 0.85 a
	Keller y Karmeli (1975)	78,46 ± 1,8 a	77,09 ± 4,61 a	77,29 ± 6,42 a	77,01 ± 8,24 a
	Barragán et al (2005)	83,85 ± 1,48 a	82,71 ± 4,31 a	82,86 ± 5,92 a	82,64 ± 7,75 a
B 12mm	Christiansen (1942)	98,04 ± 0.32 a	98,32 ± 0.23 a	98,49 ± 0.3 a	97,79 ± 0.65 a
	Keller y Karmeli (1974)	97,6 ± 0.34 a	97,83 ± 0.59 ab	99,07 ± 0.39 b	97,57 ± 0.81 a
	Keller y Karmeli (1975)	93,16 ± 0.51 a	91,71 ± 2,58 a	94,65 ± 0.38 a	92,71 ± 0.73 a
	Barragán et al (2005)	94,89 ± 0.34 a	93,36 ± 2,58 a	96,01 ± 0.17 a	94,6 ± 0.43 a