

MEJORAMIENTO DE LOS COEFICIENTES DE VARIACIÓN Y UNIFORMIDAD EN UN SISTEMA DE RIEGO PARA INVERNADERO.

Javier Ezcequiel Colimba Limaico^{1, 2*}; Lilian Marcela Chuquín Farinango²; Leonor Rodríguez Sinobas¹

¹Grupo de Investigación Hidráulica del Riego. Universidad Politécnica de Madrid. Av. Complutense s/n, C.P. 28040, Madrid, España.

javier.colimba.limaico@alumnos.upm.es - +593 999571363 (*Autor de correspondencia)

²MJ Producción Agropecuaria Sostenible, Velasco Ibarra y González Suárez, S/N, Natabuela, C.P. 100217 Atuntaqui, Ecuador.

Resumen

La escasez de agua de regadío es un problema que se hace presente a nivel mundial y el Ecuador no es la excepción. Una buena alternativa para el manejo adecuado del agua es el riego por goteo, sin embargo, en muchas ocasiones el no hacer una selección adecuada del material para la instalación del sistema de riego hace que los resultados no sean los esperados. En este sentido, el objetivo del presente trabajo fue proponer una metodología que permita hacer una selección adecuada de la manguera de riego, con la finalidad de obtener una mínima variación y una alta uniformidad de la aplicación del agua en campo. La propuesta consistió en una caracterización hidráulica del ramal, hecha en laboratorio, y la posterior evaluación de este material en campo. Los resultados muestran que el hacer una evaluación hidráulica de la manguera de riego, previo a la instalación en campo, permite hacer una buena selección de este material, con lo que se asegura un bajo coeficiente de variación y un alto coeficiente de uniformidad.

Palabras claves: coeficiente de variación, coeficiente de uniformidad, evaluación hidráulica, riego por goteo.

Introducción

A nivel mundial el agua se ha convertido en un recurso económico escaso en muchas regiones especialmente en zonas áridas y semi áridas (Buttaro *et al.*, 2015). En Ecuador también se hace presente este problema debido a que existe un déficit de agua y, para 2035 este déficit será de 46.3% de la demanda, lo que generará conflictos entre oferta y demanda de este recurso (SENAGUA, 2019). De igual manera en la provincia de Imbabura uno de los principales problemas a los que se enfrentan los agricultores es la baja disponibilidad de agua para riego (Colimba *et al.*, 2022).

En este sentido, es muy importante adoptar tecnologías que permitan hacer un aprovechamiento adecuado y eficiente del agua, siendo el riego por goteo una excelente alternativa. Dentro del riego por goteo, la elección del material para la instalación del sistema es una parte fundamental para asegurar la eficiencia de aplicación del agua. Esta eficiencia se determina mediante el coeficiente de variación y uniformidad del sistema de riego (AENOR, 2010; Medina San Juan, 2000). Para que un sistema de riego por goteo sea considerado como excelente debe contar con un coeficiente de variación inferior al 5% (ASAE, 1998), y un coeficiente de uniformidad superior al 92% (Moya, 2009). Esto permitirá un aporte de agua a las plantas, con un alto grado de uniformidad, lo que se traduce en una mayor productividad de este importante recurso.

Por lo anteriormente expuesto, el objetivo de la presente investigación fue proponer una metodología que permita hacer una selección adecuada del material de riego, con la finalidad de obtener una mínima variación y una alta uniformidad de la aplicación del agua en campo.

Materiales y Métodos

Caracterización hidráulica de la manguera de goteo

Curva de gasto y coeficiente de variación de manufactura

Se realizó en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Politécnica de Madrid, España. Se utilizó manguera de riego de 16 mm con goteros no compensantes cada 0.20 m, con las siguientes características hidráulicas proporcionadas por el fabricante:

Tabla 1. Características hidráulicas de la manguera de riego.

Modelo	Caudal nominal (0.1 MPa) (L/h)	Curva de gasto (H en mca)		Caudal (L/h)					
		K	x	Presión (MPa)					
				0.07	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
DP Line 35 MIL	2.1	0.6680	0.5002	1.87	2.25	2.78	3.23	3.63	3.99

Fuente: <https://www.irritec.es/>

Se realizaron ensayos en banco de goteros a dos temperaturas de agua (19 y 31°C), con la finalidad de determinar la curva de gasto y el coeficiente de variación de manufactura. En el banco de ensayo de goteros (Figura 1) se colocaron los tramos de manguera de

riego por goteo seleccionados, con 25 goteros, que fueron evaluados a las presiones: 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 y 0.25 MPa, tanto en sentido ascendente como descendente, durante 10 min por cada presión. El desagüe de los goteros se recolectó en probetas de 1 000 mL de capacidad, con líneas divisorias cada 10 mL. La curva de gasto del gotero se determinó mediante un ajuste potencial entre el gasto desaguado medio por presión y las presiones de los ensayos. El coeficiente de variación de gasto de manufactura del gotero se determinó, en cada ensayo, como la relación entre la desviación típica del gasto y su valor medio (Chamba, 2020; Colimba, 2022).

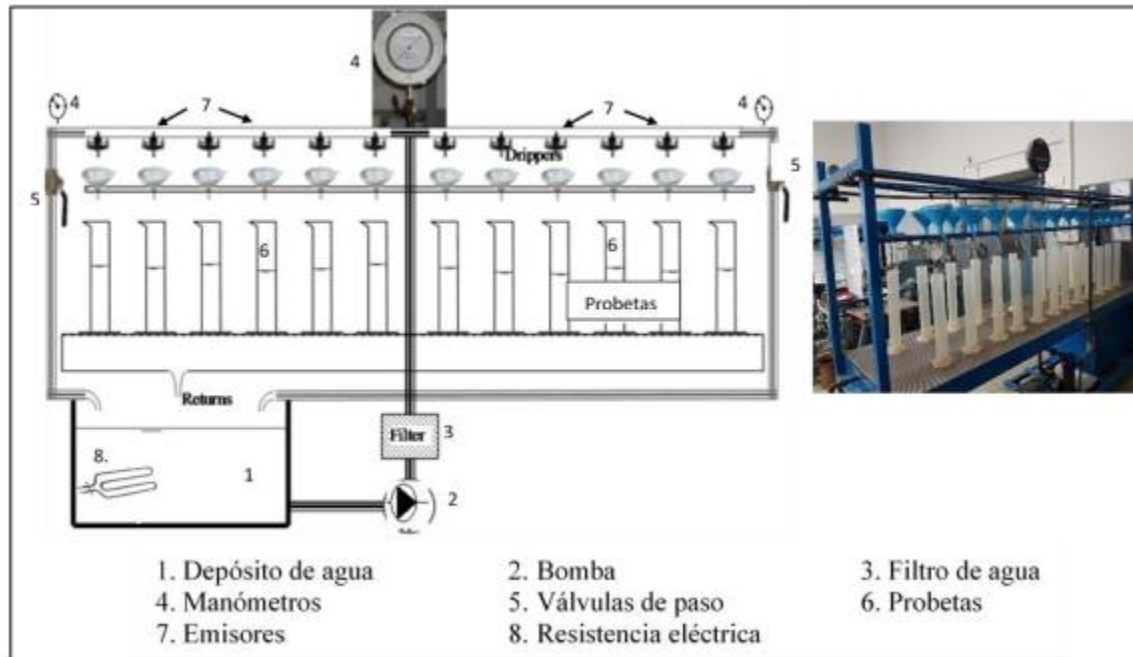


Figura 1. Esquema de banco de goteros ETSIAAB_UPM

Fuente: Chamba, 2020.

Pérdida de carga en ramal

Se realizó la caracterización de la pérdida de carga en el banco de ensayos de ramales (Figura 2), en donde se colocaron 43.80 m de la manguera de goteo y, se establecieron las condiciones de presión y caudal seleccionadas. El caudal en cabeza del ramal se midió con un contador de flujo digital, modelo CZ 2000-3M, 0.0254 m. Así mismo, también se midió la presión en cabeza y cola del ramal y la diferencia de presión entre ambos. Se utilizaron manómetros digitales, modelos 2083P y 2082P, con precisión $\pm 0.15\%$. En cada ensayo se aforaron 25 goteros, colocados en grupos de 5 emisores consecutivos y ubicados a las distancias $x/L = 0.084, 0.313, 0.500, 0.687$ y 0.916 ; estos puntos tendrían el mismo valor medio y la misma varianza que el del conjunto del ramal (Juana *et al.*, 2007).

La manguera de goteo se ensayó bajo seis presiones diferentes (0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 y 0.30 MPa) en orden ascendente y descendente, durante 10 min, con el agua a 19 °C de temperatura. Para cada presión, se determinó, la curva de gasto, el coeficiente de variación del caudal, la disminución del caudal en función de la longitud del ramal, y la pérdida de presión (%) entre cabeza y cola.

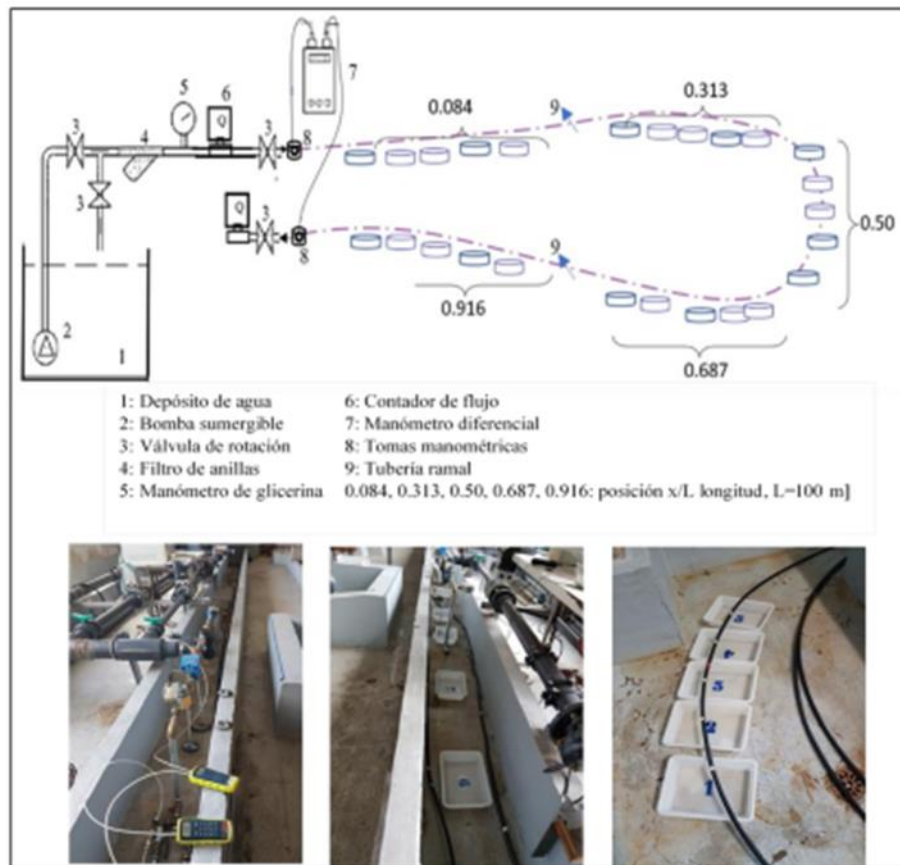


Figura 2. Banco de ramales ETSIAAB_UPM
Fuente: Chamba, 2020.

Coeficiente de variación y coeficiente de uniformidad en campo

Estos ensayos se realizaron en Ecuador, en un invernadero para cultivo de tomate ubicado en la parroquia de Natabuela, cantón Antonio Ante, provincia de Imbabura. El invernadero, tipo capilla con cubierta curva, tiene 24.50 m de largo y 14.50 m de ancho, con una superficie de 355 m², su altura bajo canal es 3.60 m y del zenit es 4.90 m, cuenta con dos cortinas laterales que sirven para ventilación y manejo de temperatura.

El invernadero se encuentra ubicado a una latitud 0° 20' 16,67" N, longitud 78° 12' 0,65" O y a una altitud de 2 445 msnm. La zona tiene una precipitación media anual entre 630 a 1 000 mm, una temperatura promedio 8°C (parte alta) y 16°C (parte baja). En general, la parroquia de Natabuela tiene seis meses secos (GAD Natabuela, 2016). El suelo es de textura franco arenosa con: densidad aparente de 1.22 g/cm³, capacidad de campo 34.81% y punto de marchitez permanente 14.31%, de humedad volumétrica.

El invernadero se dividió en cuatro bloques, cada bloque constó de ocho hileras de siembra, cada hilera tuvo 1.40 m de separación, y se colocaron 2 mangueras de goteo en cada hilera. Se seleccionaron al azar 32 goteros en cada bloque y se aplicó un riego durante 10 min (mismo tiempo utilizado en el banco de goteros) a 0.10 MPa de presión; luego se recogió el volumen desaguado y se determinó el caudal de los goteros y

finalmente, se calculó el coeficiente de variación de gasto de los goteros con la ecuación 1 (AENOR, 2010), y el coeficiente de uniformidad del sistema de riego. Este último, se determinó con la ecuación 2 propuesta por Karmeli y Keller (Medina San Juan, 2000).

$$CV = \left(\frac{\sigma}{\bar{q}}\right) 100 \quad (1)$$

Donde:

σ = desviación estándar de los caudales de los goteros medidos

\bar{q} = promedio de los caudales de los goteros medidos

$$CU = 100 \left(1 - 1.27 \frac{v}{\sqrt{e}}\right) \frac{q_{min}}{q_m} \quad (2)$$

Donde:

v = coeficiente de variación de manufactura del gotero (2.51 %).

e = número de emisores por planta (4).

q_{min} = caudal mínimo recogido.

q_m = caudal medio.

Se realizó un ensayo al inicio y al final de cada campaña de siembra, durante tres campañas, dando un total de seis ensayos, habiendo un intervalo de tiempo de 28 meses entre el primero y el último ensayo.

Todos los ensayos se realizaron con el agua a temperatura ambiente (19 – 20 °C).

Resultados y Discusión

Curva de gasto y coeficiente de variación de manufactura

A continuación, se presentan los resultados del banco de ensayo de goteros (Tabla 2):

Tabla 2. Características hidráulicas de la manguera de riego obtenidas en laboratorio.

Condiciones de ensayo	Caudal nominal (0.1 MPa) (L/h)	Curva de gasto (H en MPa)		Caudal (L/h)					Coeficiente de variación de manufactura (%)
				Presión (MPa)					
		K	x	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	
Ascendente 19°C	2.1	6.334	0.475	1.54	2.10	2.56	2.97	3.29	2.57
Descendente 19°C	2.1	6.419	0.479	1.53	2.13	2.57	2.99	3.29	2.55
Ascendente 31°C	2.1	6.267	0.470	1.54	2.13	2.52	2.94	3.31	2.52
Descendente 31°C	2.1	5.987	0.449	1.57	2.11	2.54	2.90	3.25	2.38

En la tabla anterior se observa que el valor del exponente x obtenido en laboratorio (0.47 en promedio) es muy similar al proporcionado por el fabricante (Tabla 1), así mismo, el caudal obtenido a 0.10 MPa (2.12 L/h en promedio) coincide con el caudal nominal de fábrica. Esto indica que la información proporcionada por el fabricante es verídica. En cuanto al coeficiente de variación de manufactura el valor promedio obtenido fue de 2.51%, mismo que se considera excelente según ASAE (1998).

Pérdida de carga en ramal

Las curvas de gasto media a presión ascendente y descendente se muestran en las Figuras 3 y 4, respectivamente. El exponente $x = 0.57$ es ligeramente mayor (0.47) al obtenido con el banco de ensayos de goteros.

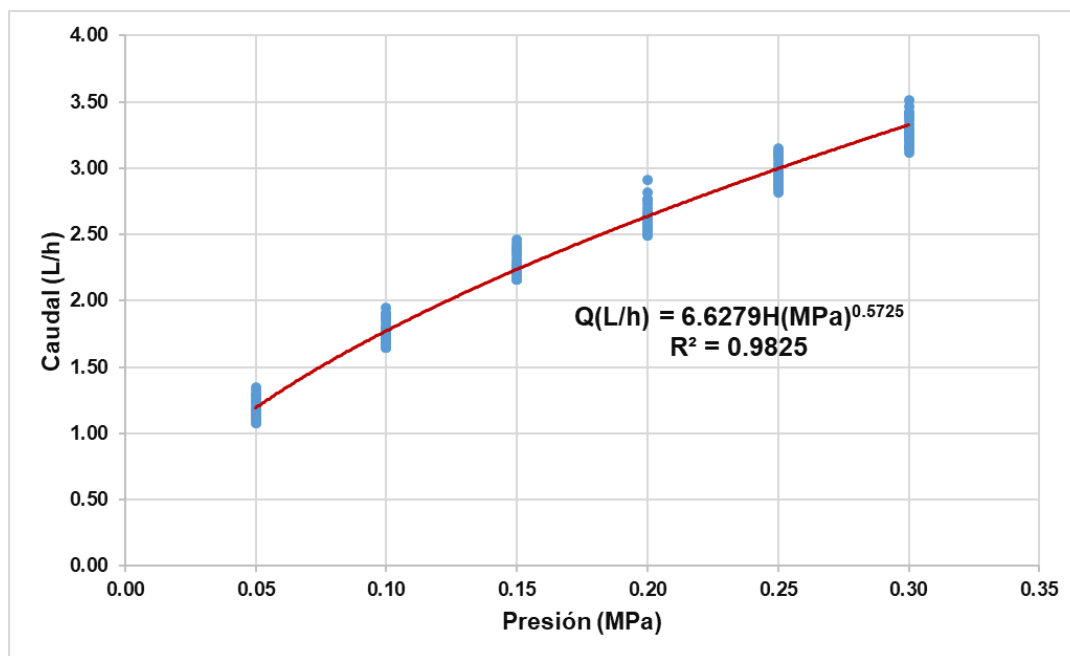


Figura 3. Curva de gasto en el ramal de 16 mm a presión ascendente.

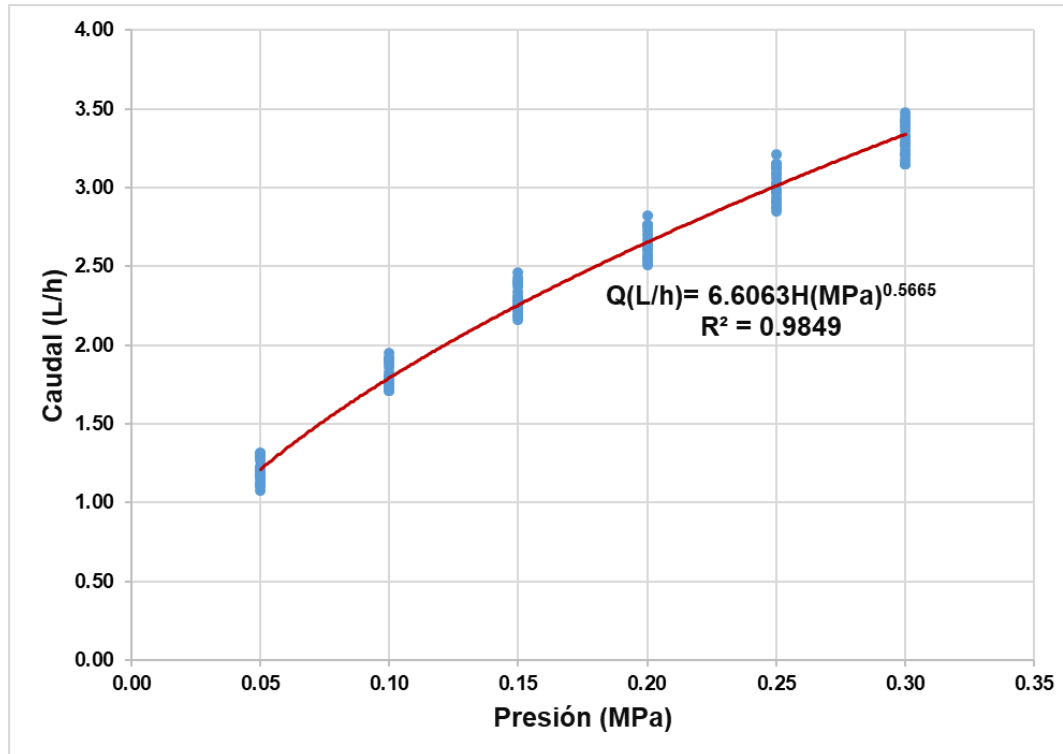


Figura 4. Curva de gasto en el ramal de 16 mm a presión descendente.

Las Figuras 3 y 4 muestran que los caudales obtenidos tanto a presiones ascendentes como descendentes son similares, por lo tanto, no se observó efecto de histéresis. Por otra parte, también se observa que, al aumentar la presión aumenta el caudal y viceversa, según una función potencial, ajustándose al comportamiento de un gotero no compensante.

La Tabla 3 y la Figura 5 muestran los caudales medios en cada uno de los cinco puntos de medida a 0.10 MPa de presión. El caudal disminuyó a lo largo del ramal; la diferencia entre el caudal del último punto de aforo (1.70 L/h) y el caudal nominal (2.10 L/h) fue 0.40 L/h, con una variación de 19.05%.

Tabla 3. Distribución del caudal en el ramal de 16 mm con presión en cabeza 0.1 MPa.

x/L	Longitud (m)	Q (L/h)
0.084	3.68	1.91
0.313	13.71	1.82
0.500	21.90	1.73
0.687	30.09	1.70
0.916	40.12	1.70

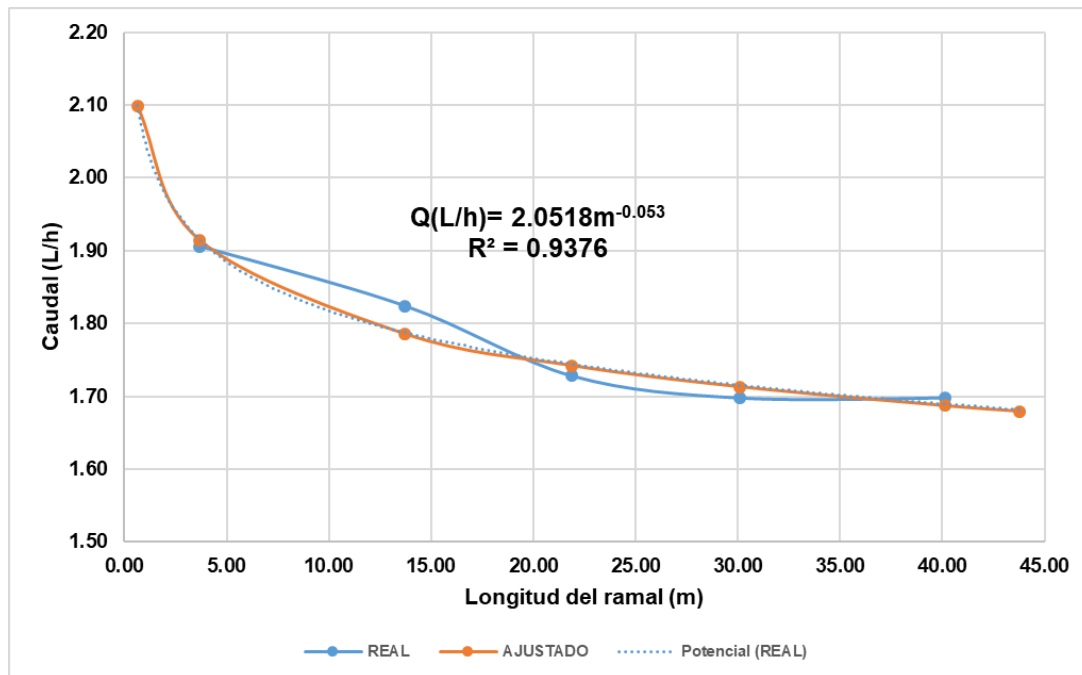


Figura 5. Distribución del caudal a lo largo del ramal a 0.10 MPa

La Tabla 4 muestra la presión en cabeza, cola y pérdidas de carga en la manguera de goteo. Se observa que, al aumentar la presión de trabajo, las pérdidas de carga aumentaron y el porcentaje de reducción de presión respecto de la presión en cabeza, disminuyó. Así a la presión de 0.10 MPa la pérdida de carga fue 0.024 MPa, el 26.37% de la presión en cabeza.

Tabla 4. Diferencias de presión y pérdidas de carga según la presión de trabajo.

	Presión de trabajo (MPa)					
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
Presión en cabeza (MPa):	0.042	0.089	0.143	0.187	0.244	0.288
Presión en cola (MPa):	0.027	0.066	0.113	0.151	0.202	0.240
Pérdida de carga (MPa):	0.015	0.024	0.031	0.036	0.042	0.048
Pérdida de carga por metro de cinta (MPa):	0.00034	0.00054	0.00070	0.00082	0.00096	0.00110
Reducción de presión (%):	35.35	26.37	21.46	19.22	17.27	16.67

Estos resultados evidencian que existe una variación considerable de caudal debido a la longitud del ramal. Según recomendaciones del fabricante la longitud máxima de instalación de la manguera evaluada es de 71 m, no obstante, si en 43 m de longitud la variación de caudal fue de 19.05%, aplicando la ecuación de la Figura 5 se obtiene una variación de 22.3 %.

Coeficiente de variación y uniformidad en campo

En las Tablas 5 y 6 se muestran los coeficientes de variación y uniformidad obtenidos en los seis ensayos. Pudiéndose observar que tanto en el uno como en el otro los porcentajes son excelentes hasta el ensayo 5, subiendo y bajando drásticamente en el

sexto ensayo, respectivamente. Pasando a ser no aceptables según ASAE (1998) y Medina San Juan (2000).

Tabla 5. Coeficientes de variación obtenidos en los ensayos en campo.

Bloque	Coeficiente de variación (%)					
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Ensayo 6
I	3.68	2.75	3.77	3.37	3.11	7.41
II	2.75	3.23	3.23	4.63	2.95	3.81
III	4.12	3.21	2.29	3.89	3.24	4.95
IV	3.20	2.70	2.73	3.15	3.51	6.17
Promedio	3.44	2.97	3.01	3.76	3.23	5.58

Tabla 6. Coeficientes de uniformidad obtenidos en los ensayos en campo.

Bloque	Coeficiente de uniformidad (%)					
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Ensayo 6
I	94.43	93.48	93.10	91.20	94.81	82.22
II	94.12	90.90	92.38	94.20	94.94	86.59
III	91.70	94.22	94.23	90.00	93.45	76.27
IV	92.60	93.08	94.25	93.46	92.84	73.40
Promedio	93.21	92.92	93.49	92.22	94.01	79.62

Conclusiones

Las características hidráulicas de la manguera de riego obtenidas en laboratorio, coinciden con las proporcionadas por el fabricante. No obstante, el ensayo de pérdida de carga en ramal permitió establecer que hay un 22.3% de disminución de caudal a la longitud máxima recomendada por el fabricante, lo que podría perjudicar al desarrollo del cultivo.

En los ensayos bajo invernadero, los coeficientes de variación y de uniformidad del sistema de riego se mantuvieron en el rango de excelentes hasta aproximadamente dos años de haber sido instalado, presentándose una alteración negativa de estos, en un tiempo cercano a los tres años, lo que pudo deberse a taponamiento de goteros por sedimentos y acumulación de fertilizantes.

La evaluación hidráulica de la manguera de riego, previo a la instalación del sistema de riego, permite seleccionar el material adecuado y saber las condiciones adecuadas para su uso, esto a su vez permite mejorar considerablemente los coeficientes de variación y uniformidad del sistema de riego. Con lo que se logrará que todas las plantas, del cultivo a establecer, puedan tener aproximadamente la misma cantidad de agua aportada para su desarrollo.

Referencias Bibliográficas

- AENOR. (2010). *Equipos de Riego. Emisores y tuberías emisoras. Especificaciones y métodos de ensayo*. Norma: UNE-EN ISO 9261:2004.
- ASAE, American Society of Agricultural and Biological Engineers, (1998). *ASAE Standards*. ASAE, 2950. Niles Road, St. Joseph, MI, USA, pp. 49085–49659
- Buttaro, D.; Santamaria, P.; Signore, A.; Cantore, V.; Boari, F.; Montesano, F.F.; Parente, A. (2015). Irrigation Management of Greenhouse Tomato and Cucumber Using Tensiometer: Effects on Yield, Quality and Water Use. *Agric. and Agric. Sci. Procedia* 4, 440–444.
- Chamba, D. (2020). *Caracterización hidráulica del riego por goteo a partir de ensayos en ramales y unidades para su proyecto y gestión económica*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Colimba Limaico, J. E. (2022). *Eficiencia en el uso del agua en el cultivo de tomate bajo invernadero en Natabuela, Ecuador*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.73024>
- Colimba-Limaico, J. E., Zobelzu-Minguez, S., Rodríguez-Sinobas, L. (2022). Optimal Irrigation Scheduling for Greenhouse Tomato Crop (*Solanum Lycopersicum* L.) in Ecuador. *Agronomy*, 12(5), 1020. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051020>
- Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) de Antonio Ante (2019). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2019*. Atuntaqui, Ecuador.
- Irritec. (2023). *Catálogo de riego por goteo*. <https://www.irritec.es/productos/riego-por-goteo/>
- Medina San Juan, J. (2000). *Riego por goteo. Teoría y práctica*. Cuarta edición. Madrid, España. Ediciones Mundi-Prensa.
- Moya, J. (2009). *Riego localizado y fertirrigación*. Cuarta edición. Madrid, España. Ediciones Mundi-Prensa.
- Juana, L., Rodríguez-Sinobas, L., Sánchez, R., Losada, A. (2007). Evaluation of drip irrigation: Selection of emitters and hydraulic characterization of trapezoidal units. *Agric. Water Manag.*, 90, 13-26. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.01.007>
- SENAGUA (Secretaría del Agua). (2019). *Plan Nacional de Riego y Drenaje 2019–2027*, SENAGUA: Quito, Ecuador. pp. 1–160.