



Modelos estadísticos matemáticos para estimar la presión y caudales en sistemas de microirrigación

Mathematical statistical models to estimate pressure and flows in micro-irrigation systems

Rider Riveras Hernández¹

<https://orcid.org/0000-0001-7891-0387>

Dixan Companioni Carrazana²

<https://orcid.org/0009-0009-3543-2296>

Pedro León Balbón¹

<https://orcid.org/0009-0009-5437-7835>

Yorgis Luis Gómez Solano³

<https://orcid.org/0009-0009-0208-5582>

Maiquel López Silva⁴

<https://orcid.org/0000-0002-0946-6160>

¹Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Ciego de Ávila, Cuba

²Empresa Agropecuaria La Cuba, Baraguá, Ciego de Ávila, Cuba

³Empresa de Acueducto y Alcantarillado, Ciego de Ávila, Cuba

⁴Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú

rider@unica.cu, dixancomp@gmail.com, prolando@unica.cu

yorgiluis92@gmail.com, maiquel.lopez@urp.edu.pe

Recibido: 2024/06/02 Aceptado: 2024/09/20 Publicado: 2024/11/18

Resumen

Introducción: los modelos estadísticos matemáticos son esenciales para el diseño y manejo de los sistemas de microirrigación y contribuyen a mejorar la eficiencia, sostenibilidad y rentabilidad de estos sistemas. **Objetivo:** El objetivo del trabajo consistió en desarrollar modelos estadísticos matemáticos para la estimación con exactitud de la presión y caudales en sistemas de microirrigación con tuberías de múltiples salidas en el organopónico 14 de julio. **Método:** la calibración y validación de los modelos desarrollados se realizó mediante el coeficiente de determinación y el

126

Cite este artículo como:

Riveras Hernández, R., Companioni Carrazana, D., León Balbón, P., Gómez Solano, Y. L. y López Silva, M. (2024). Modelos estadísticos matemáticos para estimar la presión y caudales en sistemas de microirrigación. *Universidad & ciencia*, 13(3), 126-137.

URL: <https://revistas.unica.cu/index.php/uciencia/article/view/8609>

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14103169>



error porcentual medio. **Resultados:** los resultados de la aplicación de los modelos en el sistema de microirrigación demostraron su capacidad de conocer el comportamiento del caudal y la presión en cualquier parte de la tubería lateral y generar modelos estadísticos matemáticos de tipo exponencial, potencial y polinómico con altos coeficientes de determinación y bajo error porcentual medio. **Conclusión:** Los modelos de regresión constituyen una herramienta útil para la simulación de la presión y caudales en sistemas presurizados siempre que sean previamente calibrados y validados en condiciones experimentales.

Palabras clave: modelo estadístico matemático; sistemas de microirrigación; tuberías de múltiples salidas

Abstract

Introduction: mathematical statistical models are essential for the design and management of microirrigation systems and contribute to improving the efficiency, sustainability and profitability of these systems. **Objective:** The objective of the work was to develop mathematical statistical models for the accurate estimation of pressure and flow rates in microirrigation systems with multiple outlet pipes in the 14 de Julio organoponic. **Method:** the calibration and validation of the developed models was carried out using the coefficient of determination and the average percentage error. **Results:** the results of the application of the models in the microirrigation system demonstrated their ability to know the behavior of the flow and pressure in any part of the lateral pipe and generate mathematical statistical models of exponential, potential and polynomial type with high coefficients of determination and low average percentage error. **Conclusion:** Regression models constitute a useful tool for the simulation of pressure and flows in pressurized systems as long as they are previously calibrated and validated under experimental conditions.

Keywords: mathematical statistical model; microirrigation systems; multiple outlet pipes

Introducción

El riego, ha sido implementado y desarrollado por la humanidad desde hace miles de años, lo cual se comprueba en la actualidad. A través de las ruinas de obras

127

Cite este artículo como:

Riveras Hernández, R., Companioni Carrazana, D., León Balbón, P., Gómez Solano, Y. L. y López Silva, M. (2024). Modelos estadísticos matemáticos para estimar la presión y caudales en sistemas de microirrigación. *Universidad & ciencia*, 13(3), 126-137.

URL: <https://revistas.unica.cu/index.php/uciencia/article/view/8609>

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14103169>



de riego encontradas en diversas regiones del mundo tan distantes unas de otras como: Egipto, Irán China, India y España” (Mullo, 2016).

Para lograr un adecuado riego, se debe elegir de entre los diferentes sistemas que se han desarrollado. Entre los principales que tomaremos en consideración están, el riego por: goteo, aspersión y surcos. La elección de un sistema se debe basar en varios aspectos que tienen como meta lograr una mejor producción agrícola y preservar el suelo para posteriores cultivos (Mullo, 2016).

Cerca del 10 % de las áreas con riego en el mundo reciben aplicación de agua mediante sistemas presurizado, siendo este porcentaje más elevado en países desarrollados. Las innovaciones que se introducen en la actualidad están dirigidas al mejoramiento del funcionamiento del riego y favorecen su adaptación a las condiciones específicas de suelo, topografía, cultivo y clima. (Garcés *et al.*, 2018).

Un aspecto importante para lograr un eficiente manejo de los sistemas de riego y específicamente en los sistemas presurizado lo constituye el adecuado diseño de los mismos y ello está estrechamente relacionado con el diseño hidráulico de la red de tuberías. La hidráulica de los sistemas de tuberías ha alcanzado un extraordinario desarrollo, realizándose nuevas metodologías e implementándose a la vez poderosas herramientas numéricas y computacionales para la solución de las tareas planteadas (Gonzales, 2020).

Las tuberías con múltiples salidas son un componente esencial en cada uno de los sistemas de riego presurizados existentes; sean estos de alta presión (aspersión), media (microirrigación), o baja presión (tuberías multicompuertas). El diseño hidráulico correcto de estas tuberías es una fase importante para alcanzar un adecuado funcionamiento del sistema de riego y debe ser complementado con la utilización de modelos matemáticos.

El diseño hidráulico de una tubería con salidas múltiples está condicionado por las cargas de presión en su entrada y por la uniformidad de la aplicación de agua; esta última depende de las pérdidas de carga total a lo largo de la tubería, de la topografía del terreno, así como de la característica hidráulica del emisor. La variación en el caudal del emisor está en función de la carga de presión a lo largo de la tubería la cual



es el resultado del efecto combinado de la pérdida de carga total y la pérdida o ganancia de carga debido a la pendiente del terreno donde se localiza (Ángeles *et al.*, 2010).

Los principales problemas que afectan el funcionamiento de los sistemas de riego presurizado con tuberías de múltiples salidas, están asociados a la falta de presión y la obturación de los emisores por la acumulación de sedimentos que reduce el caudal, lo que puede afectar la eficacia y uniformidad del riego (Mola *et al.*, 2019).

Por lo anterior expresado el objetivo de este trabajo es desarrollar modelos estadísticos matemáticos para la estimación con exactitud de la presión y caudales en sistemas de microirrigación con tuberías de múltiples salidas en el organopónico 14 de julio.

Materiales y Métodos

El sistema de microirrigación del organopónico 14 de Julio se encuentra ubicado en la coordenada 21°51'41.9"N, 78°46'23.9"W, zona oeste de la ciudad Ciego de Ávila dentro del antiguo parque Ricardo Pérez Alemán. Este sistema tiene una extensión de 20 000 m², posee 144 canchales de 1,40 m de ancho, 19,62 m de largo y 20.0 cm de alto cada uno, dedicados al cultivo intensivo de especies hortícolas como remolacha, zanahoria, rabanito, cebollino, lechuga, acelga, habichuela, pepino, ajo puerro, cebollino, berenjena, entre otras. Esa unidad consta de un administrativo y cinco trabajadores vinculados a la producción.

El sistema de riego evaluado está compuesto por una bomba sumergible marca KAWAMOTO procedente de Japón con un caudal de 10 L s⁻¹, una tubería principal de PVC con 75 mm de diámetro en sus primeros 10 m, después reduce a 50 mm durante 18 m y luego vuelve a reducir a 40 mm manteniéndose este diámetro hasta el final de la tubería principal. En este último diámetro están instaladas las tuberías distribuidoras de PVC con diámetro de 25 y 40 mm, en la que se conectan los laterales de PE con 19 mm de diámetros y espaciados a 2,42 m, en toda su longitud cuenta con 9 microaspersores espaciados a 2,40 m que distribuyen el agua a los cultivos.

El sistema empleó la técnica de microirrigación de baja presión con la utilización de microaspersores del tipo NaanDanJain compuesto por: puente, rotor, dispositivo

antineblina, conector mariposa, estaca, manguera fina y conector dentado. El emisor trabajó con un caudal inicial de 39,6 L h⁻¹ y presión de 1,7 bar (170 kPa).

El principio de conservación de la energía se utilizó mediante el balance energético aplicado primeramente entre el punto inicial donde se mide la presión a la entrada del lateral y todas las salidas a lo largo de la tubería de riego. Este principio se materializó a través de la ecuación de Bernoulli el cual establece una relación inversa entre la energía que circula por el conducto y la velocidad (Marín, 2021). El caudal a la entrada del lateral de los sistemas se determinó mediante la suma de los caudales descargado por cada emisor (Figura 1) a partir de la siguiente ecuación:

Figura 1

Caudal a la entrada del lateral de los sistemas

$$Q_0 = \sum_{i=1}^N q_i$$

Donde Q_0 es el caudal total del lateral (m³ s⁻¹), q_i el caudal que sale por cada emisor (m³ s⁻¹), N el número total de salida del lateral, i el índice que expresa la cantidad de emisores evaluados ($i = 1, 2, \dots, N$).

El caudal total del lateral a medida que circula por cada tramo de la tubería va disminuyendo por el efecto combinado de la pérdida de energía y la derivación del caudal q_i en cada salida (Figura 2); como se expresa en la siguiente ecuación:

Figura 2

Caudal total del lateral a medida que circula por cada tramo de la tubería

$$Q_i = Q_{i-1} - q_i$$

Donde Q_i es el caudal de circulación por cada tramo (m³ s⁻¹), Q_{i-1} es el caudal de circulación en el tramo anterior (m³ s⁻¹), q_i el caudal que sale por cada emisor (m³ s⁻¹), i el índice que expresa la cantidad de emisores evaluados ($i = 1, 2, \dots, N$).

A partir de la primera salida del lateral, el diámetro se mantiene constante; pero el caudal varía debido a que se trata de una tubería de múltiples salidas; por tanto, se debe tener en cuenta la velocidad en el análisis de cada tramo. En todos los casos la

velocidad del fluido (Figura 3) se calculó por el método de la velocidad económica según Ladino *et al.* (2020) a través de la siguiente ecuación:

Figura 3

Velocidad del fluido

$$v_i = \frac{4 \cdot Q_i}{\pi \cdot D^2}$$

Donde v_i es la velocidad del flujo en cada tramo (m s^{-1}), Q_i el caudal de circulación por cada tramo ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), D el diámetro del lateral (m).

Para el cálculo de la carga de presión en cada salida se estableció un balance energético entre el punto de medición de la presión (0) y los diferentes puntos de salida a lo largo del lateral (i) con la utilización de la ecuación de Bernoulli (Figuras 4 y 5) según Girola *et al.* (2020) la cual se escribe mediante la siguiente ecuación:

Figura 4

Balance energético entre los puntos de medición de la presión

$$\frac{P_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g} + Z_0 = \frac{P_i}{\gamma} + \frac{v_i^2}{2g} + Z_i + \sum_0^i hf_T$$

Figura 5

Suma de las pérdidas de carga totales

$$\sum_0^i hf_T = 1,10hf_i$$

Donde P_0 es el valor de la presión medida en el manómetro a la entrada del lateral ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$), P_i es el valor de la presión en cada salida del lateral ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$), v_0 la velocidad del flujo al inicio del lateral (m s^{-1}), Z_0 la altura del lateral en el punto de medición de la presión (nivel de referencia) (m), v_i la velocidad del flujo en cada tramo (m s^{-1}), Z_i la altura del lateral en cada salida (m), $\sum hf_{T0-i}$ la suma de las pérdidas de carga totales por fricción y localizadas (se asumieron como el 10 % de las pérdidas por fricción) entre los dos puntos analizados (m), hf_i la pérdida de carga por fricción en cada tramo (m), y el peso específico del agua ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-2}$), g la aceleración de la gravedad (m s^{-2}).



Para calcular la carga a presión en cada salida del lateral (Figura 6) se despejó el término donde se calcula la presión de la ecuación de la Figura 4, obteniéndose la siguiente expresión:

Figura 6

Calculo de la carga a presión en cada salida del lateral

$$\frac{P_i}{\gamma} = \frac{P_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g} + Z_0 - \frac{v_i^2}{2g} - Z_i - \sum_0^i h_{fT}$$

Resultados y Discusión

Cálculo de la presión en cada salida

Teniendo en cuenta las principales características del sistema de microirrigación del organopónico 14 de Julio y aplicando el método volumétrico, se realizaron mediciones de campo con el objetivo de obtener los caudales de salida. Después de realizar los ajustes a los datos tomados y determinar la presión, se calculó el error relativo promedio el cual debe quedar por debajo del 20 % para que sean aceptable los modelos estadísticos matemáticos.

El procedimiento para la determinación de los modelos estadísticos, fue desarrollado con el propósito de estimar la presión en cada salida de la tubería de múltiples salidas en el sistema de microirrigación del organopónico 14 de Julio, se implementó de forma progresiva, segmento a segmento desde el inicio hasta el final del lateral. En este nuevo procedimiento se tuvieron en cuenta los principios físicos de conservación de la masa y conservación de la energía.

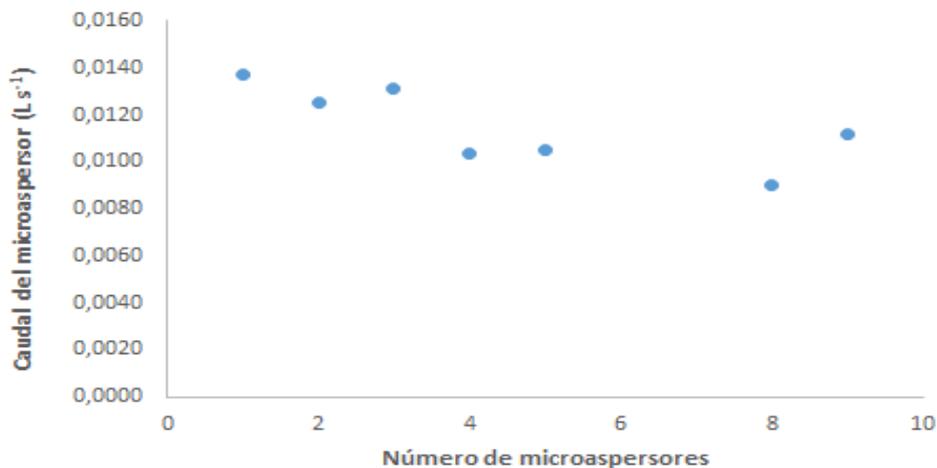
El principio de conservación de la masa se aplicó en esta investigación para la cuantificación del caudal a la entrada del lateral y su variación a lo largo de la línea regante, teniendo en cuenta que el caudal que entra por un extremo de la tubería tiene que ser igual al caudal que sale (Riaño, 2021); lo que constituye el punto de partida para desarrollar modelos estadísticos matemáticos que permitan el mejoramiento del manejo del sistema de microirrigación del organopónico 14 de Julio y se expresa mediante la ecuación de continuidad.

Modelos estadísticos matemáticos utilizados en el sistema de microirrigación

En la Figura 7 se muestra la relación entre el caudal del microaspersor y el número del microaspersor obtenida a partir del aforo volumétrico inicial realizado en canteros del organopónico 14 de Julio. Los resultados demuestran una dispersión de los caudales en el tercio inicial del lateral muy por encima de la media que es de $0,011 \text{ L s}^{-1}$ ($39,6 \text{ L h}^{-1}$). Esta dispersión estuvo ocasionada entre otras cosas por problemas de manejo del sistema expresado en entregas no uniforme del caudal a lo largo del lateral.

Figura 7

Relación entre el caudal del microaspersor y el número de microaspersores.

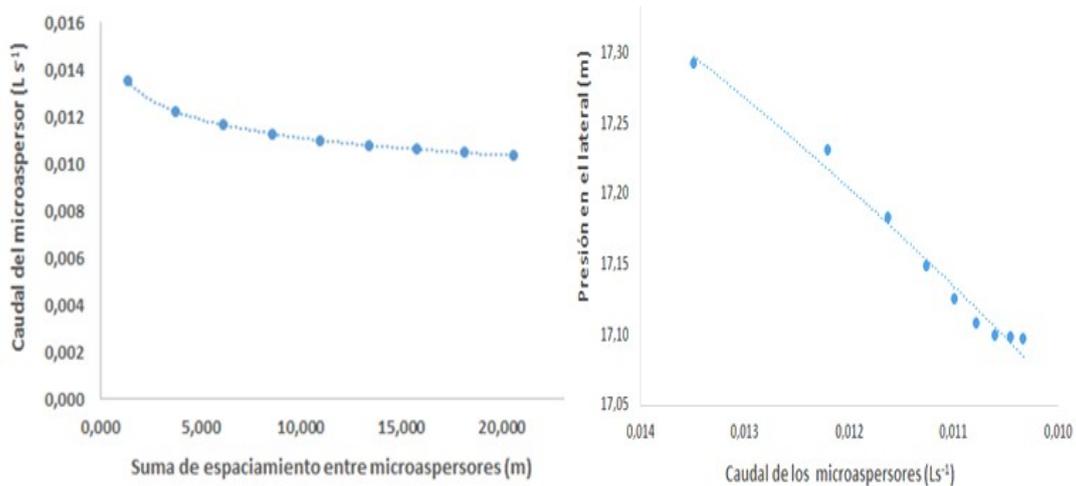


Nota. Elaboración propia.

En la Figura 8 se presenta la relación entre el caudal del microaspersor y la suma de espaciamiento entre emisores obtenida a partir de la corrección de las dificultades que se encontraron en el estado físico de los microaspersores, lográndose un mejor funcionamiento y entrega de caudales a lo largo del lateral de riego. De esta manera se logró un modelo de tipo potencial (Figura 9) con un elevado coeficiente de determinación (R^2) de 0,9987 y un error porcentual medio de (E_{pm}) de 0,003 %.

Figura 8

Relación del caudal del microaspersor respecto a la suma de espaciamiento entre emisores y el caudal que sale por cada microaspersor



Nota. Elaboración propia.

Figura 9

Modelo potencial que relaciona el caudal con la suma de de espaciamiento entre emisores

$$q_i = 0,0212 \cdot \Sigma E^{0,4011}$$

Donde q_i es el caudal del microaspersor (L s⁻¹); ΣE la sumatoria de espaciamiento entre emisores (m).

En la Figura 10 se muestra la ecuación que relaciona las presiones en cada microaspersor de la tubería lateral con el caudal de cada microaspersor, la cual se ajusta de forma satisfactoria al modelo potencial con un alto coeficiente de determinación (R^2) de 0,9841 y un error porcentual medio (E_{pm}) de 0.04 % < 20 % lo que indica su alta confiabilidad para utilizarse con fines de pronósticos. La ecuación encontrada fue:

Figura 10

Modelo potencial que relaciona la presión en cada salida de la tubería lateral con el caudal que sale por cada aspensor

$$P_i = 21,13q_i^{0,0465}$$

Donde P_i es la presión en cada salida de la tubería lateral (m); q_i el caudal que sale por cada aspensor (L s⁻¹).

En la Figura 11 se presenta la relación entre las presiones en cada microaspersor de la tubería lateral con la sumatoria de espaciamiento entre microaspersor, la cual se ajusta de forma satisfactoria al modelo potencial, con un alto coeficiente de determinación (R^2) de 0, 0,9842 y un error porcentual medio (E_{pm}) de 0,10 % < 20 % lo que indica su alta confiabilidad para utilizarse con fines de pronósticos. La ecuación encontrada se expone en la Figura 12:

Figura 11

Relación de la presión en el lateral respecto a la sumatoria de espaciamiento entre microaspersores y el caudal de circulación por cada tramo

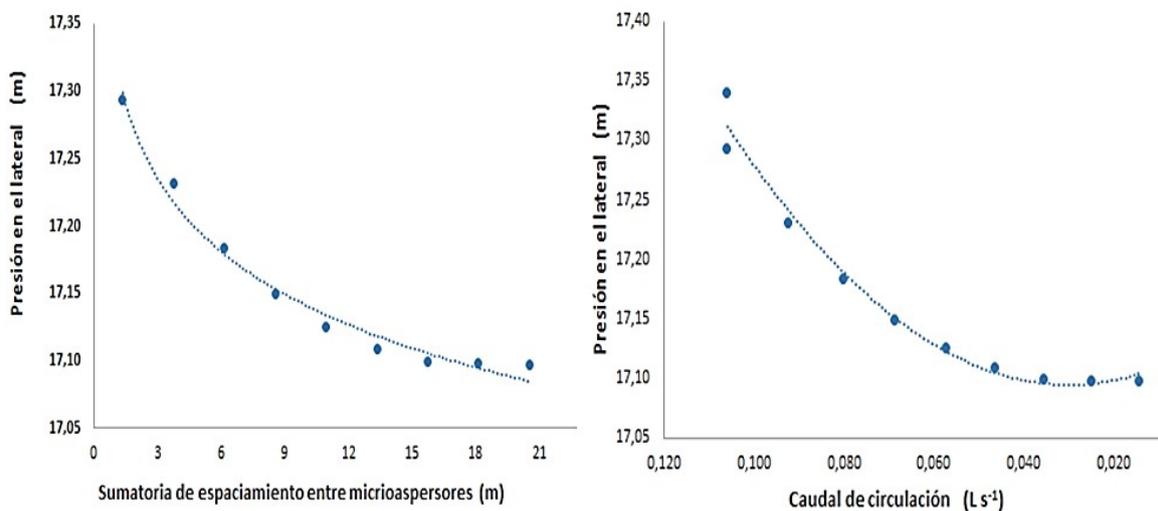


Figura 12

Modelo potencial que la presión en el lateral respecto a la sumatoria de espaciamiento entre microaspersores

$$P_i = 17,322\Sigma E^{-0.005}$$

Donde P_i es la presión en cada salida de la tubería lateral (m); ΣE la sumatoria de espaciamiento entre salidas (m).

En la Figura 13 se muestra la ecuación que relaciona las presiones en cada salida de la tubería lateral con el caudal de circulación de cada tramo, la cual se ajusta de forma satisfactoria al modelo polinomial de grado dos, con un alto coeficiente de determinación (R^2) de 0,9803 y un error porcentual medio (E_{pm}) de 0,05 % < 20 % lo que indica su alta confiabilidad para utilizarse con fines de pronósticos:



Figura 13

Modelo polinomial de grado dos que relaciona la presión en cada salida de la tubería lateral respecto al caudal de circulación de cada tramo

$$P_i = 37,732Q_i^2 - 2,2711Q_i + 17,129$$

Donde P_i es la presión en cada salida de la tubería lateral (m); Q_i el caudal de circulación de cada tramo ($L\ s^{-1}$).

Conclusiones

Se logra desarrollar modelos estadísticos matemáticos basado en mediciones de campo, para el diseño hidráulico de tuberías de múltiples salidas de un sistema de microirrigación, que permitió estimar el comportamiento de la presión en función del caudal de salida $P_i=f(q_i)$, la sumatoria del espaciamiento entre salidas $P_i= f(\sum E_i)$ y el caudal de circulación en cada tramo $P_i=f(Q_i)$.

Los modelos desarrollados para estimar la presión en función de las sumatoria del espaciamiento entre salidas, de los caudales de circulación y de salida, cuenta con una alta fiabilidad debido a que el coeficiente de determinación (R^2) es superior a 0,95 en todos los casos analizados.

Los errores porcentuales medio arrojados por las tres curvas se encuentran en el rango establecido para ser aceptable, siendo los valores 0,5; 0,6 y 0,7 % respectivamente menores que el 20 %.

Referencias Bibliográficas

- Ángeles, V., Arteaga, R. e Ibáñez, L. A. (2010). Dimensionamiento de tuberías con salidas múltiples convencionales y telescópicas con distribución discreta de caudales. *Ingeniería de Agua*, 17(1), 51-68. <https://iwaponline.com/IA/article-abstract/17/1/51/68512>
- Garcés, J. T., Camposano, O. C., Macías, C. S. y Vásquez, V. S. (2018). Calidad del riego por aspersión subfoliar en cacao (*Theobroma cacao* L.) en la finca San Vicente, Los Ríos, Ecuador. *La Técnica*, (20), 1-10. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6723166>



- Gonzales, E. A. (2020). *Comportamiento hidráulico del sistema de riego por aspersión mediante herramientas computacionales, Paras, Ayacucho 2020* [tesis de pregrado, Universidad César Vallejo] Respositorio Institucional UCV. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/63382>
- Girola, J. C., Sosa, N. y Mujica, A. (2020). Desarrollo del software RIEDI para el diseño de sistemas de riego localizado. *Revista Universidad & ciencia*, 9(1), 43-57. <https://revistas.unica.cu/index.php/uciencia/article/view/1253>
- Ladino, E. O., García, C. A. y García, M. C. (2020). La implicancia económica mediante Newton Rapshon para el desarrollo una aplicación Android para el diseño de diámetro de tuberías a presión. *Aglala*, 11(1), 149-168. <http://revista.curn.edu.co/index.php/aglala/article/view/1577>
- Marín, G. (2021). Algunas concepciones CTSA de estudiantes de noveno grado sobre conceptos termodinámicos. *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, (49), 239-254. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121-38142021000100239&script=sci_arttext
- Mola, B., Bonet, C., Rodríguez, D., Guerrero, P., Avilés, G. y Noa Torres, Y. (2019). Calidad del agua en la producción de organopónicos. *Ingeniería Agrícola*, 9(2). <https://ojs.edicionescervantes.com/index.php/IAgric/article/view/1098>
- Mullo, J. I. (2016). *Diseño de un sistema de riego parcelario para la comunidad San Pedro, ubicada en la Parroquia La Matriz, Cantón Guamote, Quito* [Tesis de pregrado, Universidad de San Francisco de Quito]. Respositorio Institucional USFQ. <http://repositorio.usfq.ec/handle/23000/5719>.
- Riaño, F. (2021). Los aportes de Leonhard Euler al desarrollo de la Hidráulica. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 42(3), 82-102. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1680-03382021000300082&script=sci_arttext&tlng=en

Conflicto de interés

Los autores no declaran conflictos de intereses.



Cite este artículo como:

Riveras Hernández, R., Companioni Carrazana, D., León Balbón, P., Gómez Solano, Y. L. y López Silva, M. (2024). Modelos estadísticos matemáticos para estimar la presión y caudales en sistemas de microirrigación. *Universidad & ciencia*, 13(3), 126-137.

URL: <https://revistas.unica.cu/index.php/uciencia/article/view/8609>

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14103169>



Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/). Se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de los contenidos y no realice modificación de la misma.

Cite este artículo como:

Riveras Hernández, R., Companioni Carrazana, D., León Balbón, P., Gómez Solano, Y. L. y López Silva, M. (2024). Modelos estadísticos matemáticos para estimar la presión y caudales en sistemas de microirrigación. *Universidad & ciencia*, 13(3), 126-137.

URL: <https://revistas.unica.cu/index.php/uciencia/article/view/8609>

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14103169>