

Implementación de un sistema de riego automatizado para el cultivo de café en la finca Villa de Lobos, San Francisco, Cundinamarca

Implementation of an automated irrigation system for coffee cultivation at Villa de Lobos farm, San Francisco, Cundinamarca

Álvarez, J. M.*, Aponte, J. D. y Quintero, L. D.

Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Colombia.

Fecha de recepción: marzo de 2020 / Fecha de aceptación: julio de 2020

Resumen

El presente estudio se desarrolló bajo los lineamientos de la Fundación Universitaria Agraria de Colombia, donde la prioridad es la investigación orientada a crear, desarrollar, sistematizar, aplicar y difundir el conocimiento para el progreso económico y social, con enfoque territorial. Así como la aplicación de tecnologías en el sector agrario que buscan nuevas alternativas para el desarrollo sostenible y el apoyo a los campesinos en sus diversas labores agrícolas.

La investigación se desarrolló en la finca Villa de Lobos, ubicada en el municipio de San Francisco, Cundinamarca, en la cual se identificó la dificultad de regar las plantas de café en las temporadas de verano, donde el propietario ha realizado riegos manuales durante años y, con el pasar de estos, su salud se ha venido deteriorando.

Bajo este contexto, el hecho de asimilar las necesidades propias de los campesinos, que relacionan sus conocimientos de manera empírica, y al verificar que no existe un control óptimo para el riego de café en dicha región, se desarrolló e implementó un sistema de riego automatizado por aspersión, a través de la medición de temperatura y humedad en el terreno de la siembra, los cuales son procesados por medio de un PLC, encargado de activar el sistema, ya sea de manera manual o automática, según las necesidades propias del usuario.

Para su implementación se utilizó la metodología VDI 2206, como modelo de procedimiento flexible para el diseño de sistemas mecatrónicos. A partir de esta estructura, se logró poner en

* Correspondencia: alvarez.john@uniagraria.edu.co

marcha tecnologías que ofrecen a los agricultores ahorro de tiempo y de agua en temporadas de verano, donde este recurso se hace escaso, mejorando las propiedades físicas de la planta y haciendo que el desarrollo y la producción de estas no se vean atrasados.

Es un proyecto con un costo relativamente bajo con relación a su beneficio, capaz de adaptarse a cualquier tipo de cultivo. Finalmente, arrojó resultados favorables desde el punto de vista técnico, al entregar la cantidad de líquido necesaria para la plantación de café a través de un sistema de riego controlado y preciso. Además, se resalta el hecho de que se lograron estrategias sostenibles que contribuyen al ahorro del recurso hídrico, impactando de manera social y fortaleciendo las técnicas de producción en el sector agrícola.

Palabras clave: riego automatizado, café, agroindustria, PLC, innovación rural.

Abstract

This study was conducted under the guidelines of the Fundación Universitaria Agraria de Colombia, which prioritizes research aimed at creating, developing, systematizing, applying, and disseminating knowledge for economic and social progress with a territorial focus. The project focused on applying technology in the agricultural sector to generate sustainable alternatives and support farmers in their daily activities.

It was carried out at Villa de Lobos Farm, in San Francisco, Cundinamarca, where manual irrigation during dry seasons had become increasingly difficult and detrimental to the farmer's health. In response to this issue and the absence of proper irrigation control for coffee crops in the region, an automated sprinkler irrigation system was developed and implemented. This system uses soil temperature and humidity sensors, whose data are processed by a PLC, which controls irrigation automatically or manually based on the user's needs.

The system was designed using the VDI 2206 methodology, a flexible procedure model for mechatronic system design. This approach enabled the implementation of technologies that save time and water, especially during periods of drought, while improving the physical conditions of the plants and preventing delays in crop development. The project proved to be technically effective and economically feasible, with low implementation costs and adaptability to various crop types.

The system successfully delivered precise water quantities to the coffee plantation and promoted sustainable practices that optimize water use, generate social impact, and enhance agricultural production techniques.

Keywords: Automated irrigation, coffee, agribusiness, PLC, rural innovation.

Introducción

El proyecto se implementó en la finca Villa de Lobos, la cual está ubicada en el municipio de San Francisco, Cundinamarca, vereda Arrayán Bajo; y se encuentra a una altitud media de 1520 m s. n. m.

Lacabeceramunicipalselocalizaalos4°58'38" de latitud norte y 74°17'32" de longitud oeste.

Cuenta con una temperatura promedio de 21 °C, una velocidad de viento de 0,975 m/s y aproximadamente 12,13 horas de luz al día.

Diseño agronómico

Una vez definida la situación geográfica y topográfica del proyecto, se presenta un listado en la Tabla 1 (NASA, 2022) de sus características más importantes para el diseño del sistema de riego por aspersión.

Tabla 1. Características del sector del cultivo

Característica	Valor
Área cultivada	6390 m ²
Temperatura promedio	21 °C
Humedad relativa mínima	64,81 %
Velocidad del viento	0,975 m/s
Horas de luz	12,13 horas
Tipo de suelo	Franco arenoso
Profundidad de raíces	0.25 m
Eficiencia deseada en riego	80 %

Fuente. Elaboración propia, con base en datos proporcionados por NASA (2022).

Según Rendón Sáenz y Giraldo Herrera (2019), la profundidad de las raíces para el café es de 25 cm. Teniendo esto en cuenta para la caracterización del cultivo y tras seleccionar los datos más críticos, se calcula la evapotranspiración potencial del terreno, utilizando la Ec. (1). Donde f = factor de Blaney-Criddle; p = horas de luz expresadas

en porcentaje anual, de acuerdo con la latitud del lugar; y t = temperatura del lugar.

Reemplazando en la Ec. (1) y teniendo en cuenta que el valor de las horas de luz se halla por la ubicación del sitio en la tabla de Blaney-Criddle, que representa el porcentaje anual de horas luz en el sitio.

$$f = p(0,46 t + 8,13) \quad (1)$$

$$f = 0,27(0,46 (21^\circ) + 8,13) = 5,15 \text{ mm/día} \quad (2)$$

De esta manera, la evapotranspiración corresponde a:

$$ET_o = 3,2 \text{ mm/día} \quad (3)$$

Es decir, el terreno de la finca evapotranspira 3,2 L/m² en una parcela. Para hallar la evapotranspiración total se utiliza la Ec. (4), además de conocer el coeficiente de un cultivo en etapa media, el cual, según la FAO, corresponde a 1,1.

$$ET_c = 3,2 \text{ mm/día} * 1,1 = 3,52 \text{ mm/día} \quad (4)$$

Esto significa que la demanda hídrica del cultivo en la finca es de 3,52 L/m².

A pesar de ello, los parámetros de evapotranspiración cambian con el paso del tiempo, así como las precipitaciones, por lo cual la demanda puede variar y debe ser ajustada periódicamente.

Con el fin de determinar sus capacidades retentivas de agua, se debe identificar el tipo de suelo. Para ello, se extrajo una muestra para observar y conocer su composición. De esta manera, se define de forma intuitiva el tipo de suelo.

Tabla 2. Características del tipo de suelo franco-arenoso

Característica	Valor
Capacidad de campo	16 %
Punto de marchitez	7 %
Humedad disponible	9 %
Densidad aparente	1,50 g/cm ³
Velocidad de infiltración	20 mm/h

Fuente. Elaboración propia, con base en datos proporcionados por la FAO (2005).

Su textura se percibe áspera al tacto, con terrones fácilmente rompibles, por lo que se puede afirmar que se trata de un suelo arenoso. Al ser un terreno con una alta productividad agrícola y superficial, se puede decir que es franco, por lo cual su denominación sería del tipo franco-arenoso (FAO, 1999).

Las características principales de este tipo de terreno se detallan en la Tabla 2.

Con los valores de las características principales del terreno para la retención de agua, se procede a resolver la Ec. (5) para determinar la lámina disponible en el terreno.

$$L_d = H_d * \rho_a * Pr \quad (5)$$

Donde H_d = Capacidad de campo - punto de marchitez; ρ_a = densidad aparente; Pr = profundidad de raíces del cultivo; y $L_d = 0,09 * 150 \text{ g/cm}^3 * 25 \text{ cm} = 3,375 \text{ cm} = 33,75 \text{ mm}$.

Esto quiere decir que el suelo tiene una capacidad de almacenamiento de 33,75 L/m². Ahora bien, si se relaciona con la necesidad hídrica del cultivo, se establece que el intervalo de riego, a partir de la Ec. (6).

$$I_r = \frac{L_d}{ET_c} \quad (6)$$

Donde L_d = lamina disponible y ET_c = evotranspiracion del cultivo.

$$I_r = \frac{33,75 \text{ mm}}{3,52 \text{ mm/día}} = 9,5 \text{ días} \quad (7)$$

De acuerdo con la anterior información, se observa que es necesario realizar riego cada 9 días, asegurando el abastecimiento de agua durante este periodo.

$$L_r = 3,2 \frac{\text{mm}}{\text{día}} * 9 \text{ día} = 31,68 \text{ mm} \quad (8)$$

Esto significa que, durante este tiempo, el cultivo consumirá 31,68 L/m². Dicho valor se encuentra por debajo de la capacidad de retención de agua del terreno, lo que indica que el intervalo de riego es suficiente.

Tabla 3. Características aspersor círculo parcial plástico

Característica	Valor
Referencia	Aspersor círculo parcial de 1/2"
Presión de trabajo	15 m.c.a
Caudal	0,13 L/s
Diámetro de mojado	12 m

Fuente. Elaboración propia, con base en datos proporcionados por Agrofer (2022).

Para conocer cuánta lámina de agua se riega, es necesario conocer las características del aspersor, detalladas en la Tabla 3.

$$0,13 \text{ lt/s} = 468 \text{ lt/h}$$

$$L_{asp} = \frac{468 \text{ lt/h}}{12\text{m} * 12\text{m}} = 3,25 \text{ mm/h} \quad (10)$$

Con base en dicha información, se calcula la lámina brindada, utilizando la Ec. (9). Debido a que el diámetro de mojado es de 12 m, se deja un espacio cuadrado entre aspersores, quedando a una distancia de 12 m entre aspersores en el mismo lateral y un espacio del mismo valor entre cada lateral.

Esto significa que cada aspersor brindará una lámina de 3,25 L/m² en una hora. Conociendo este dato, se procede a determinar el tiempo que debe durar el riego para completar la lámina necesaria para satisfacer el cultivo, utilizando la Ec. (11)

$$L_{asp} = \frac{Q_{asp}}{D_{aspersores} * D_{entre laterales}} \quad (9)$$

Donde Q_{asp} = caudal emitido por el aspersor; $D_{aspersores}$ = distanica entre aspersores; y $D_{entre laterales}$ = distancia entre laterales.

$$T_r = \frac{L_d}{L_{asp} * \eta_{riego}} \quad (11)$$

Donde L_d = lamina disponible; L_{asp} = lamina de aspersor; y η_{riego} = eficiencia esperada de riego

$$T_r = \frac{31,68 \text{ mm}}{3,25 \text{ mm/h} * 0,8} = 12,18 \text{ horas} \quad (12)$$

Con una eficiencia esperada del 80 %, el aspersor deberá regar 12,18 horas para completar la lámina requerida. Las horas disponibles para riego se establecieron en 20 horas al día, de tal manera que se puede realizar un turno de riego por día. Por lo tanto, el número total de turnos que se realizarán en el intervalo de tiempo es de 9 turnos. Mientras que el área de riego corresponde a 710 m² por día, completando el riego total en nueve días.

Por las condiciones del terreno, se decidió dividir el área en siete laterales, regando durante siete días. Entre tanto, el intervalo de cada línea de riego es de 9 días, y el área por turno pasa a ser igual a 912,85 m².

El almacenamiento del agua utilizada para el riego se encuentra a 61,96 m del sistema de riego. Entre tanto, el reservorio tiene una capacidad de almacenamiento de 30 m³, es decir, 30 000 L. El reservorio se llena en un tiempo de 18 horas, lo que corresponde a una razón de 1667 L/h.

Esto indica que el tanque estará lleno al día siguiente, lo cual no será un problema para cumplir con la demanda hídrica del cultivo, además de que el caudal por línea se describe en la Ec. (13).

$$Q_{\text{línea}} = 5 * 468 \frac{\text{lt}}{\text{hr}} = 2340 \frac{\text{lt}}{\text{hr}} \quad (13)$$

Donde cantidad de aspersores por línea = 5 y caudal del aspersor = 468 L/h.

Según el tiempo de riego necesario, el total de agua que se gastará por día es de 28 050 L/día. Esto significa que la capacidad del tanque satisface esta demanda. Con base en esta información, se calcula la velocidad en la tubería, así como la mayor pérdida que se puede obtener en todo el sistema de tuberías, la cual es de 98,61 m.c.a. Finalmente, se calculan las pérdidas totales del sistema, incluyendo las presiones de los aspersores y el desnivel del terreno, a partir de la Ec. (14).

$$H_{\text{total}} = 98,61 \text{ m. c. a} + 15 \text{ m. c. a} - 18 \text{ m} = 95,96 \text{ m. c. a} \quad (14)$$

Diseño eléctrico

Una vez definido el sistema hidráulico, se determina el sistema eléctrico. Es importante resaltar que en la vereda se cuenta con energía monofásica; por lo tanto, solo se pueden elegir motobombas con voltaje de 110 V y una potencia hasta 2 HP. Teniendo en cuenta las pérdidas totales, se optó por utilizar una motobomba centrífuga JS2-2MW.

Con base en lo anterior, se diseña el esquema de potencia para el accionamiento del motor, seleccionando un cable de calibre AWG #8, el cual es óptimo para soportar hasta 32 A y evitar que ocurran recalentamientos y posibles incendios. La fase y el neutro llegan directamente al guardamotor; después, la línea atraviesa el contactor, que es accionado directamente por el PLC.

Como parte de la protección del sistema, se cuenta con un interruptor de flotador, el cual desactiva la señal eléctrica cuando el tanque está vacío.

Para conocer la condición del terreno, se empleó un controlador MT30, el cual cuenta con tres salidas tipo contacto, capaces de cerrarse cuando los valores de humedad se encuentran por debajo del 70 %, ya que, según Rendón Sáenz y Giraldo Herrera (2019), esta debe ser la humedad óptima para el crecimiento del café.

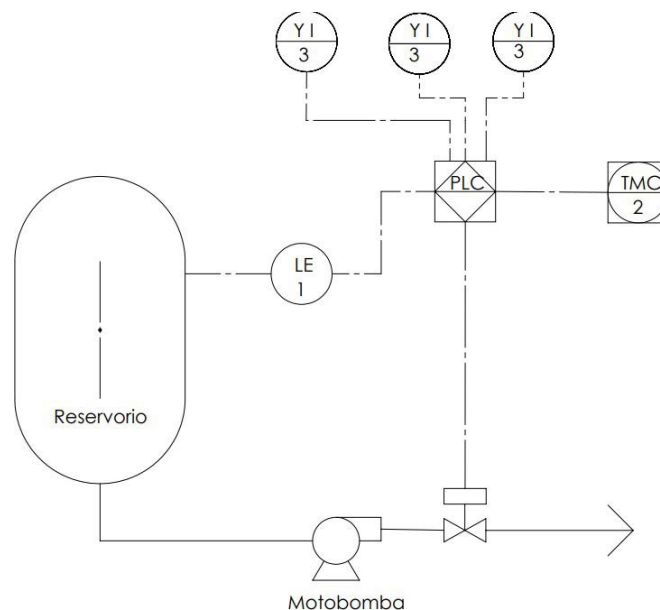
El PLC recibe su alimentación por medio de una fuente de poder de 24 VDC, al igual que el controlador MT-530E. Por lo tanto, se conecta un disyuntor bipolar para proteger el controlador contra cortocircuitos y sobrevoltajes. En sus entradas recibe la señal de 24 VDC proveniente del flotador. Mientras que el contacto normalmente cerrado del relé térmico se conectó en serie con el botón “paro de emergencia”, para detener su funcionamiento en caso de fallas en la tubería o en el sistema. La primera posición es en modo manual, que activa el sistema de riego sin importar la humedad ni la situación horaria.

El segundo selector se denomina automático, que activa el sistema teniendo en cuenta el sensor de humedad y el horario actual. Las salidas activan el contactor de la motobomba, la electroválvula que habilita el paso de fluido y los indicadores de arranque y paro.

Una vez dadas las condiciones para el funcionamiento y el accionamiento por el selector, se activará un retardo a la conexión de 5 s.

Esto permitirá que la electroválvula se active al instante y la motobomba lo haga después de 5 s. En paralelo, se conecta una señal normalmente cerrada que indica el estado inicial del sistema en paro; esta condición solo se ve interrumpida por la señal abierta del paro de emergencia. En caso de que el relé térmico active su contacto, se encenderá un piloto indicador de falla. En la Figura 1 se detalla el diagrama de tuberías e instrumentación correspondiente.

Figura 1. Diagrama P&ID del sistema



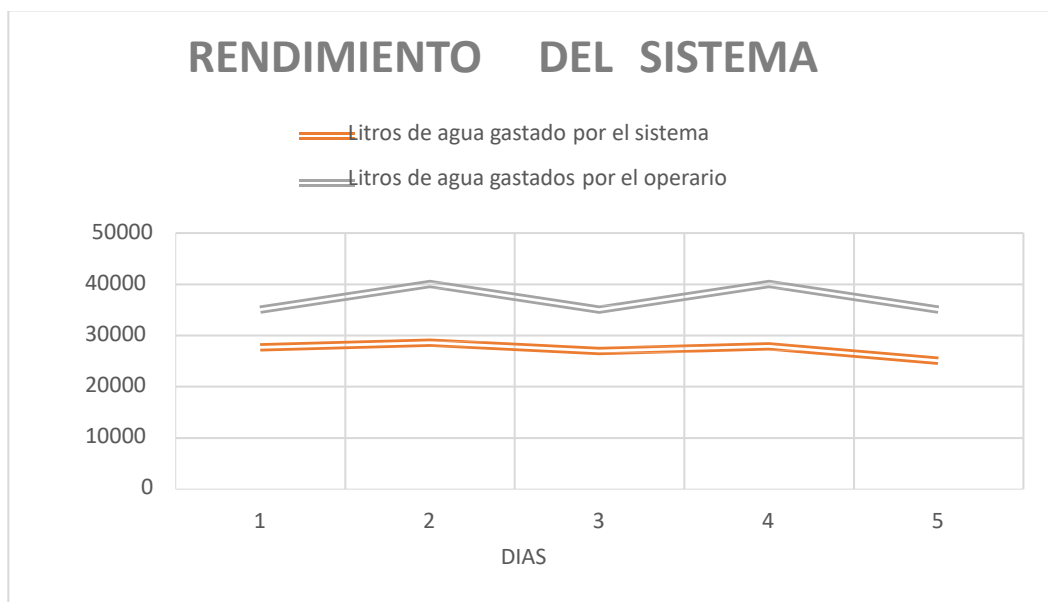
Fuente. Elaboración propia.

Resultados

El sistema se puso a prueba durante 5 días, realizando el riego en modo automático, y se comparó con el método que se realizaba previamente, consistente en llenar manualmente un tanque de 5000 L.

Se realizó el riego en los extremos del terreno, en un área de 710 m², dando como resultado la Figura 2. Para tomar las mediciones del operario, se verificó el número de veces en que llenó el tanque de 5000 L al regar la superficie establecida, mientras que la cantidad de agua utilizada por el sistema se midió con base en la profundidad restante en el reservorio.

Figura 2. Rendimiento del sistema



Fuente. Elaboración propia.

Se logró evidenciar que el operario gastó 37 000 L, mientras que, al hacer uso del sistema de riego automático, se utilizaron 27 160 L, lo que indica una diferencia de 9840 L, evidenciando un ahorro de agua del 36 %, aproximadamente.

Conclusiones

La implementación del sistema de riego por aspersión automatizado en la finca Villa de Lobos demostró un impacto significativo

tanto en la optimización del recurso hídrico como en la mejora de las condiciones de trabajo del agricultor. El sistema permitió reducir en aproximadamente un 36 % el consumo de agua frente al método manual, lo cual se traduce en una mayor sostenibilidad operativa, especialmente en épocas de escasez.

Además del ahorro de agua, se logró mejorar la eficiencia del riego, cubriendo un mayor número de plantas en menor tiempo. Este resultado se debe a la automatización basada

en sensores de humedad y temperatura, lo cual permitió una gestión más precisa del recurso, evitando excesos de riego que puedan afectar el cultivo. El sistema integra un tablero de control en tiempo real, facilitando el monitoreo y la toma de decisiones por parte del productor sin necesidad de intervención constante.

Desde el punto de vista técnico y económico, el sistema demostró ser funcional, escalable y de bajo costo relativo en comparación con su beneficio, lo que lo convierte en una solución viable para otros productores en condiciones similares. Por tanto, los resultados obtenidos en la finca Villa de Lobos abren un panorama favorable para replicar esta tecnología en otras zonas del municipio de San Francisco y de la provincia del Gualivá, fortaleciendo las capacidades productivas locales mediante el uso de tecnologías apropiadas y sostenibles.

Este proyecto no solo evidencia el potencial de la ingeniería mecatrónica aplicada al agro, sino que también refleja el compromiso con el desarrollo rural, la transferencia tecnológica y el mejoramiento de las condiciones de vida del pequeño productor campesino.

Referencias

- Agrofer. (2022). *Aspersor Plástico Sectorizado 1/2"*. AGROFER AL S.A.S. <https://Repositoriotec.Tec.Ac.Cr/Handle/2238/9879>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (1999). *Educación Ambiental para el Trópico de Cochabamba*. FAO. <https://www.fao.org/3/Ah645s/AH645Soo.htm>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2005). Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. *Boletín de Suelos de la FAO*, 79, 1-113.
- NASA. (2022). *Power Data Access Viewer*. Nasa. <https://Power.Larc.Nasa.Gov/Data-Access-Viewer/>
- Rendón Sáenz, J. y Giraldo Herrera, A. (2019). Distribución de raíces en café variedad Castillo bajo dos arreglos espaciales. *Revista Cenicafé*, 70(1), 7-17. <https://orcid.org/0000-0002-5676-4670>