

Prototipo de un sistema de riego automatizado en árboles de cacao (*Theobroma cacao*) controlado vía internet con dispositivos móviles

Prototype of Automated Irrigation System in Cocoa Trees (*Theobroma cacao*) Controlled via Internet with Smartphone

Fausto Freire Carrera¹, Olga Chadrina², José Moreano Velasco¹, Byron Torres Blacio¹, Yelitza García Orellana³

¹<http://orcid.org/0000-0003-4307-5048> Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, Ecuador. ffreire@ute.edu.ec

²<http://orcid.org/0000-0002-5134-129X> Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, Ecuador.

³<http://orcid.org/0000-0001-9973-9080> Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, Venezuela. yelitzagarcia@ucla.edu.ve

Fecha de recepción: 29/05/2019 Fecha de aceptación del artículo: 06/11/2019



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: [10.18041/1794-4953/avances.2.5257](https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.5257)

Como citar: Citar como: F. Freire Carrera, O. Chadrina, J. Moreano Velasco, B. Torres Blacio y Y. García Orellana. Prototipo de un sistema de riego automatizado en árboles de cacao (*Theobroma Cacao*) controlado vía internet con dispositivos móviles, *Avances*, vol. 16, n.º 2. 2019. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.5257>

Resumen

El objetivo del artículo es mostrar cómo se diseñó-construyó un prototipo de sistema para automatizar el riego y sus procesos, así como determinar momentos y cantidades de agua para árboles de cacao, controlado desde internet mediante una interfaz para dispositivos móviles y computador personal (PC). Se utilizó la ecuación de Hargreaves-Samani (HS). El diseño consta de sensores de clima y humedad del suelo en tiempo real. El servidor es el encargado de realizar los diferentes cálculos e implementar la lógica que permite decidir cuánto y cuándo regar. El usuario interactúa con el sistema mediante la interfaz web, lo que le permite ver toda la información en tiempo real a través cualquier celular inteligente o PC y hacer modificaciones. En conclusión, se mostró que la fórmula de HS se puede utilizar con resultados adecuados para el cálculo de la lámina de riego y que el sistema proporciona al cultivo los requerimientos hídricos de manera adecuada y oportuna.

Palabras clave: cacao, riego, evapotranspiración, interfaz.

Abstract

The main objective of this work was to design and build a system that allows automating irrigation and its processes to determine moments and quantities of water for cocoa trees, controlled from the Internet through an interface for mobile devices and PCs (personal computer). To determine evapotranspiration the Hargreaves-Samani (HS) equation was used. The design of the system consists of climate sensors and soil moisture in real time. The server is in charge of performing the different evapotranspiration calculations and implementing the logic that allows deciding how much and when to water. The user interacts with the system through the web interface, allowing him to see all the information in real time, through any smartphone or PC, being able to make modifications. In conclusion, it was shown that the HS formula can be used with adequate results for the calculation of the irrigation sheet and that the system works to provide the crop with water requirements in an appropriate and timely manner.

Keywords: cocoa, irrigation, evapotranspiration, interface.

Introducción

En el Ecuador, el cacao (*Theobroma cacao*) es un cultivo de interés económico para los agricultores de las provincias de Los Ríos y del Guayas, pues sus almendras son atractivas en los mercados internacionales, por ser un producto de calidad denominado fino de aroma. El rendimiento promedio comercial estimado es 300 kg/ha-1/año-1 [1], inferior al promedio mundial de 480 kg/ha-1/año-1. Estos bajos rendimientos, posiblemente, se deban a un manejo deficiente e inadecuado del riego.

Un estudio realizado en el valle cálido del Alto Magdalena con plántulas de *T. cacao* demostró que la falta de agua en el suelo cierra los estomas en las plantas de cacao, altera el intercambio de gases y acentúa el déficit de presión de vapor, principalmente al mediodía cuando aumenta la evapotranspiración. La planta de cacao en niveles de contenido de humedad cercanos a su capacidad de campo presenta buen desarrollo; de ahí que se concluya que las plántulas de cacao son muy sensibles al exceso y especialmente al déficit de agua [2].

Tanto la sequía como el aumento de temperatura se incrementarán por los cambios climáticos, y muchos cultivos serán afectados por este drástico cambio, entre ellos los de la planta del cacao (*Theobroma cacao* L.). Tanto el déficit hídrico como el aumento de temperatura pueden ocasionar daños fisiológicos y bioquímicos que disminuyen la productividad de esta especie [3].

Basándose en el promedio mensual de precipitación de las zonas cacaoteras del Ecuador, se puede inferir que el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) en las condiciones locales presenta un periodo de déficit hídrico bastante marcado entre los meses de julio y diciembre, que vienen relacionados con la baja producción de cacao reportados para ese periodo, lo cual incide directamente en la rentabilidad del cultivo.

La Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO) aboga por la ecuación de Penman-Monteith [4] como modelo estándar para estimar la evapotranspiración de referencia (ET₀), porque se considera que tiene una mejor precisión. Sin embargo, en regiones donde las variables meteorológicas, como la radiación solar, la velocidad del viento y la humedad relativa no se miden, se recurre a la ecuación de Hargreaves-Samani (HS) como una alternativa, simplemente porque solo necesita temperaturas mínimas y máximas del aire.

Los métodos de programación del riego más comúnmente usados por los agricultores son: la programación de acuerdo con el calendario (número de días pasados desde el último riego), la observación del cultivo para detectar cambios de color o escarbar en el suelo y sentir la tierra para estimar el contenido de humedad. La programación calendarizada no toma en cuenta los días extremos del clima, lo cual puede ocasionar problemas de un año a otro. Saber observar el cultivo demanda experiencia y un “buen ojo” —algunos agricultores lo tienen; otros, no—; pero aun cuando se tenga un “buen ojo”, en el momento en que la planta muestre signos visibles de estrés, ya habrá ocurrido una pérdida parcial de la cosecha. El palpar la tierra puede dar buenas estimaciones, pero les toma mucho tiempo a los agricultores. Además, cuando se usa esta técnica, se necesitan tomar en cuenta las características del suelo en la zona de raíces y puede ser difícil calcular la profundidad de la zona de raíces [5].

La agricultura de precisión se puede definir como la utilización de las tecnologías de la información y la comunicación en la agricultura, en la búsqueda de maximizar el rendimiento,

rentabilizar la producción, disminuir los costes, además de mantener una agricultura sostenible procurando llegar a la máxima eficiencia en el uso de los recursos.

El objetivo principal de este trabajo fue diseñar y construir un sistema que automatice el riego y sus procesos, esto es, determinar momentos y cantidades de agua que se deben suministrar, así como los componentes físicos y lógicos para su aplicación a los árboles de cacao, controlado desde internet mediante una interfaz para dispositivos móviles inteligentes y computador personal (PC).

1. Metodología

La investigación desarrollada fue de tipo experimental de campo.

1.1. Ubicación del ensayo

El ensayo se llevó a cabo en la provincia de los Ríos, Babahoyo, Ecuador, localizada en una zona climática denominada tropical monzónico; con un clima tropical seco y con una temperatura media que oscila entre 22 y 33 °C, precipitación promedio anual de 1867 mm. Se utilizaron árboles jóvenes de cacao bajo riego con microaspersores, en un suelo franco arenoso.

1.2. Determinación de las necesidades hídricas del cultivo

El riego se esparció con base en la reposición de la lámina evapotranspirada por el cultivo de cacao, utilizando la metodología de dos pasos [6], en que se calcula la evapotranspiración de referencia del día anterior y se aplica la ecuación HS, con los datos de temperaturas máxima y mínima diarias correspondientes, obtenidas a través de un sensor digital DS1820 y contrastada con los valores de diferencia de contenido de humedad del suelo, proveniente de las sondas YL69.

1.2.1. Evapotranspiración del cultivo (ET_c)

La evapotranspiración de un cultivo es un proceso simultáneo mediante el cual un área de cultivo pierde agua por evaporación del suelo y transpiración del follaje. Con el método del coeficiente único de cultivo (K_c), se llevó a cabo el cálculo integrando los efectos combinados de la transpiración y evaporación del suelo. Así se obtuvo la siguiente ecuación.

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (1)$$

Donde:

ET₀ es la evapotranspiración de referencia (mm).

K_c es el coeficiente del cultivo.

1.2.2. Evapotranspiración de referencia (ET₀)

La ET₀ es la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia que ocurre sin restricciones de agua [6]. Esta variable se calculó con el método HS. Un estudio hecho por Tabari [7], que evaluó cuatro modelos para determinar la ET₀, concluyó que HS es el modelo más preciso en climas cálidos, húmedos y semiáridos.

Para la estimación de la ET_0 en regiones donde las mediciones meteorológicas son escasas, la ecuación de HS se puede utilizar con mayor precisión [8].

Diversos autores han concluido que el HS es un método alternativo cuando no existen datos para aplicar el método Penman-Monteith [9]-[11].

La ecuación de HS es un modelo sencillo donde solo se necesitan temperaturas mínimas y máximas del aire, además de datos geográficos, como la latitud del sitio de estudio, para la estimación de la radiación extraterrestre [12].

$$ET_0 = 0,0023(t_{med} + 17,78)R_0 * (t_{max} - t_{min})^{0,5} \quad (2)$$

Donde:

ET_0 es la evapotranspiración potencial diaria (mm d-1).

t_{med} es la temperatura media diaria (°C).

R_0 es la radiación solar extraterrestre (mm d-1) [4]

t_{max} es la temperatura diaria máxima (°C).

t_{min} es la temperatura diaria mínima (°C).

1.2.3. Coeficientes de cultivo (Kc)

Para el cálculo de la lámina de riego aplicada en los árboles de cacao, se tomó el valor de Kc de 0,6 [13], con la utilización de pulsos de calor para determinar la transpiración horaria a partir del medidor de flujo de savia y estimar los coeficientes de cultivo (Kc).

1.3. Humedad del suelo

Se instalaron tres sensores tipo YL69 previamente calibrados, a 10, 20 y 30 cm de profundidad, de acuerdo con lo observado por [14], quienes encontraron que las raíces secundarias del cacao se encuentran en los primeros 30 centímetros del suelo y son encargadas de tomar los alimentos y el agua que la planta necesita para su normal desarrollo.

Estos datos se promediaron para obtener los valores de humedad del suelo y se establecieron los valores de capacidad de campo (CC) y punto permanente de marchitez, en 23 y 9%, característicos de suelos franco arenosos.

1.4. Diseño del sistema

Con este sistema, el usuario dispondrá de un seguimiento por control remoto, además de una base de datos para observar cómo fluctúan las variables a lo largo de periodo de plantación de su cultivo. El sistema posee una alta robustez y calidad comparable a los sistemas de monitorización disponibles en el mercado, pero con un coste menor. El sistema se desarrolló con base en la metodología del modelo en V para sistemas mecatrónicos [15], que comprende seis etapas para obtener el producto final (figura 1).

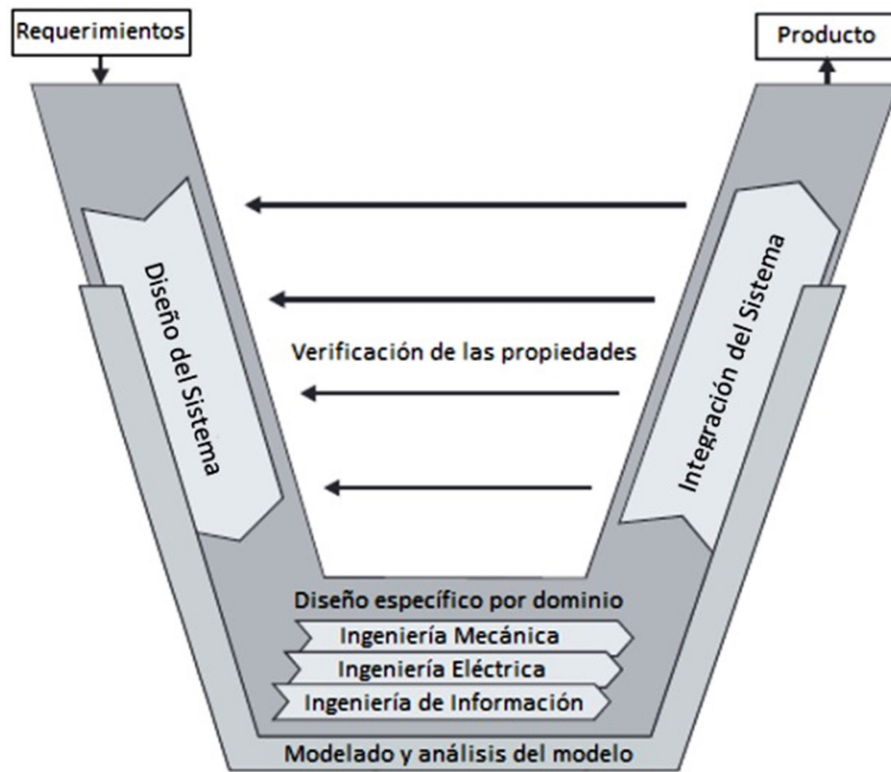


Figura 1. Modelo en V

El sistema consta de un dispositivo encargado de enviar los valores obtenidos por los sensores a un servidor; en este se desarrolló una aplicación que permite captar, almacenar y procesar dichos valores para la puesta en marcha de los actuadores del sistema de riego.

Una vez integrados los subsistemas, el prototipo nos permite la validación respecto al accionamiento de los actuadores.

Se tiene una base de datos para almacenar la información recopilada, con sus respectivas relaciones para una interacción más dinámica con esta.

La interfaz brinda la visualización del estado del sistema de riego, los valores en tiempo real de cada uno de los sensores, así como la posibilidad de cambiar el modo de activación de los actuadores, ya sea de forma automática o manual.

1.4.1. Diseño general del sistema

El sistema se basa en la tecnología de IoT (internet of things), por lo que cuenta con un servicio en la nube, configurado para realizar los cálculos respectivos, aplicar la lógica de riego y tomar decisiones para activar o desactivar los actuadores del sistema de riego.

El desarrollo de una interfaz web permite que el usuario interactúe con el sistema, a través de cualquier dispositivo móvil inteligente, mediante un navegador.

Para la comunicación inalámbrica con el servidor se requiere usar las redes de telecomunicación de las operadoras de celular.

1.4.2. Diseño del prototipo

El prototipo físico consta de una bomba de agua, una electroválvula, el microcontrolador (Arduino DUE), la tarjeta SIM800 para Arduino, dos relés para la puesta en marcha de los actuadores y la fuente de alimentación de 12 voltios a 2 amperios.

Se instaló un pequeño tablero de control, fijando un riel din con borneras para la distribución de energía, tanto 110 VAC como 12 VDC. La fuente de alimentación proporciona la alimentación de la tarjeta SIM800, el Arduino DUE y la electroválvula, todo herméticamente sellado ante posibles fugas de agua. La bomba de agua y la electroválvula se accionan mediante el relé, activando posteriormente los microaspersores.

1.4.3. Diseño eléctrico y de control del prototipo

La placa SIM800 admite una entrada de voltaje de entre 5 y 26 voltios. No se debe proporcionar una corriente menor de 2 amperios cuando la tensión es de 5 a 9 voltios. La fuente con una salida de 12 VDC a 2 amperios abastece el consumo eléctrico de forma satisfactoria a las placas de control (Arduino y SIM800) y la electroválvula (figura 2).

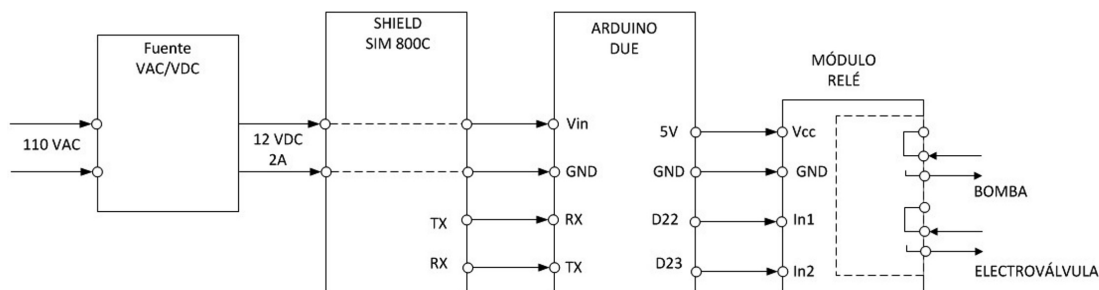


Figura 2. Diagrama de conexiones

El módulo de dos relés de estado sólido es alimentado por la placa Arduino. La activación de cada relé funciona ante la señal digital de la tarjeta de control.

La bomba se alimenta a 110 VAC, y es accionada por un relé de estado sólido, que responde ante la señal digital emitida por el Arduino.

Las librerías permiten una rápida configuración de la placa Arduino y la SIM800 para el envío de los datos al servidor. La librería ArduinoJson permite que los datos se empaqueten en formato JSON, ya que el servidor admite este formato.

En la figura 3 se muestran las actividades que ejecuta la tarjeta Arduino: interacción con el servidor y activación o desactivación de los actuadores en el prototipo físico.

1.4.4. Diseño de la base de datos

A fin de trabajar de forma más dinámica con los datos, se establecieron las diferentes relaciones que deben existir entre las tablas, cada una de las cuales son creadas con base en la lógica de funcionamiento.

Para cada parcela bajo riego se tiene un terreno cultivado donde existe un sistema centralizado de abastecimiento de agua (bombas de agua); sin embargo, se divide el terreno por sectores de riego para una mejor distribución. Cada sector cuenta con cierto número de electroválvulas.

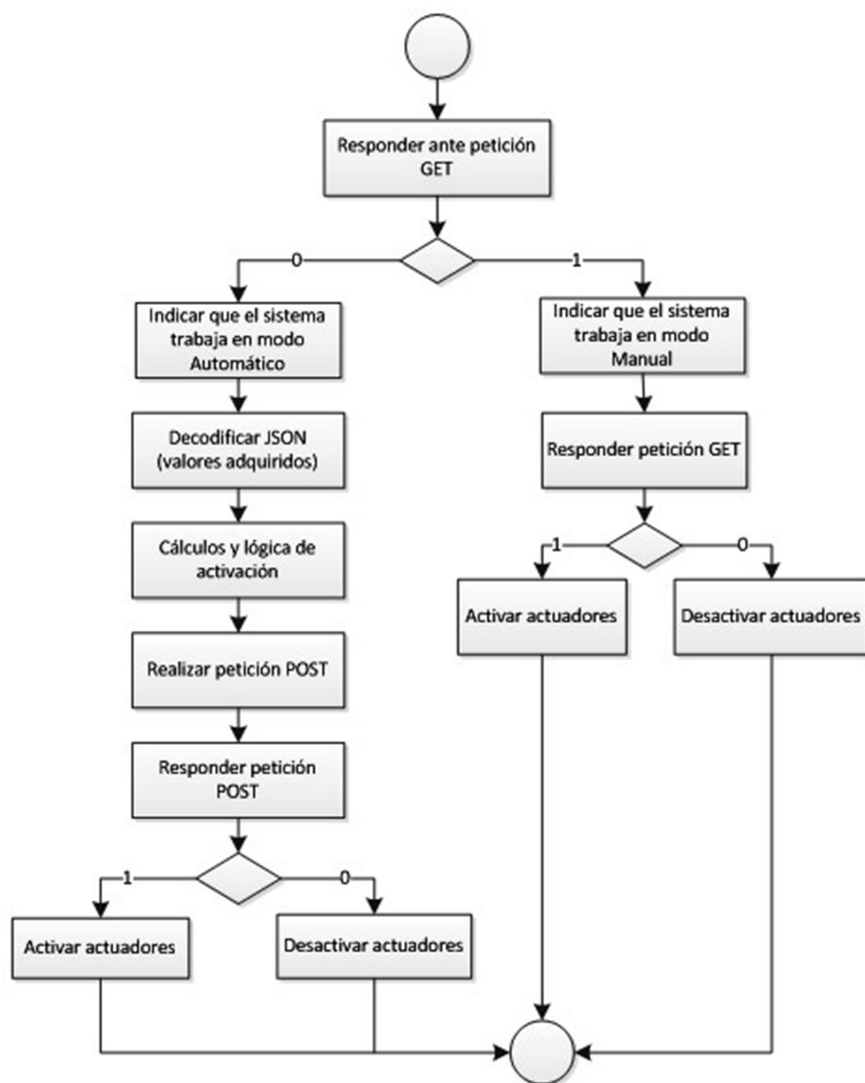


Figura 3. Diagrama de actividades de la tarjeta Arduino

Estas interrelaciones permiten la interacción más flexible con respecto a la parcela y sector al que se necesite realizar algún tipo de consulta, tanto desde el servidor como desde la placa Arduino.

1.4.5. Diseño del aplicativo web

Para la configuración de la nube se levantó un servicio LAMP, es decir: Linux, Apache, MySQL y PHP. La utilización de Slim Framework permitió de manera sencilla la implementación de un servicio API, para decodificar el empaquetado JSON de los datos. Dentro de la API se codifican los métodos de petición POST y GET.

Dentro del servicio API ingresamos las fórmulas para obtener valores que representan la evapotranspiración del cultivo y el contenido de agua en el suelo. La implementación de la lógica consiste en mantener un equilibrio del recurso hídrico, evitando el estrés de la planta.

Las ventanas de visualización son estructuradas en HTML5, y su apariencia estética es mejorada con CSS. Consta de una ventana de inicio para el usuario, dos ventanas de ingreso y registro de usuarios y una ventana de contacto.

Al ingresar con el usuario y contraseña se puede navegar dentro de tres ventanas más: la primera ventana muestra registros de valores de los sensores; la segunda, de manera más intuitiva con el usuario, muestra gráficas para una mejor apreciación de las variaciones que presentan las mediciones, y la última ventana permite al usuario modificar el modo de activación de los actuadores (manual o automático).

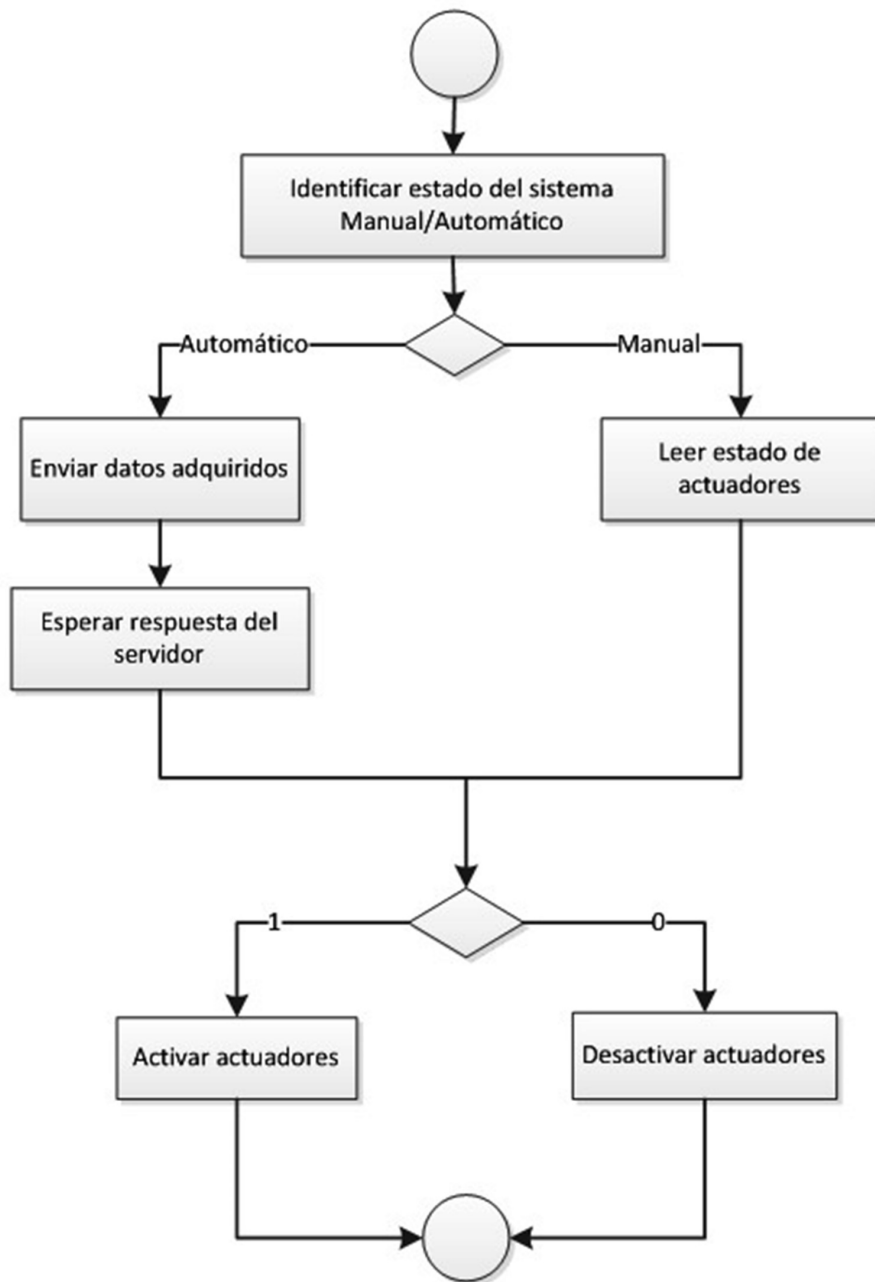


Figura 4. Diagrama de actividades del servicio API

La figura 4 indica cada una de las actividades que cumple el servicio API, cuyos objetivos finales son la activación y desactivación del sistema de riego tanto para el modo manual como para el automático.

2. Resultados y discusión

De forma conjunta, tanto el hardware como el software funcionan de manera correcta; las tarjetas de control (Arduino y SIM800) reciben y envían satisfactoriamente los datos desde el servidor y hacia este, respectivamente; el servidor decodifica y procesa los datos captados sin presentar inconvenientes y la base de datos almacena los valores y actualiza el estado del sistema (automático o manual) y estado de actuadores (activados o desactivados).

Completado el diseño del sistema, se procedió al montaje de la página web con sus respectivas ventanas, con la distribución establecida. Para el inicio se codificó una ventana con información sobre el proyecto (figura 5). La pestaña superior de navegación es similar para el resto de las ventanas.



Figura 5. Ventana de inicio de página web

Dentro del marco de funcionamiento del sistema, fue necesario analizar sus momentos de activación, porque son los eventos críticos en los cuales el cultivo sufre un déficit del recurso hídrico. Los rangos registrados para cada uno de los sensores permiten la activación de los actuadores, es decir, se produce el riego en el cultivo.

2.1. Pruebas de conexión

Al enviar los datos desde la placa Arduino se obtiene como respuesta “sensor agregado” por parte del servidor, es decir, los datos se han recibido y almacenado en la base de datos de manera satisfactoria.

```
COM7 (Arduino Due (Programming Port))
Esperando RED... OK
Conectado a internet3gsp.alegro.net.ec
Código de estado: 200
Objeto de respuesta: 0
Enviando datos del sensor
Código de estado: 200
Objeto de respuesta: {"error":{"text":"Sensor agregado"}}
0
```

Figura 6. Respuestas por parte del servidor

Mediante la comunicación serial entre la placa Arduino DUE y el PC (figura 6), se logró constatar las respuestas por parte del servidor. El código de estado “200” es una respuesta del servidor http ante una petición estándar correcta.

Similar resultado se obtuvo al emplear una placa Arduino, pues demostró su adecuado funcionamiento en campo en la automatización del riego en horas específicas [16].

2.2. Tiempo de retraso

De manera experimental, los intervalos de tiempo se establecieron cada 15 minutos, para registrar los valores de cada uno de los sensores simulados. Por otra parte, se registraron los tiempos de respuesta del servidor ante las peticiones del sistema.

Al servidor se le realizan dos tipos de peticiones: POST y GET, que permiten insertar y obtener datos, respectivamente. Se observó que al insertar datos, el tiempo de respuesta por parte del servidor es mayor que cuando se obtienen, porque seguido de la petición POST, el servidor realiza los cálculos respectivos, los valores son ingresados a la base de datos y, finalmente, se obtiene la respuesta del servidor; por otro lado, la petición GET obtiene directamente los valores de la base de datos, y los envía como respuesta.

Los valores promedios para el método POST y GET son: 651,03 y 99,64 milisegundos, respectivamente. El tiempo de respuesta por parte de los dos métodos no afecta el correcto funcionamiento del sistema (figura 7), porque dichos tiempos son relativamente rápidos para la velocidad de respuesta que requiere.

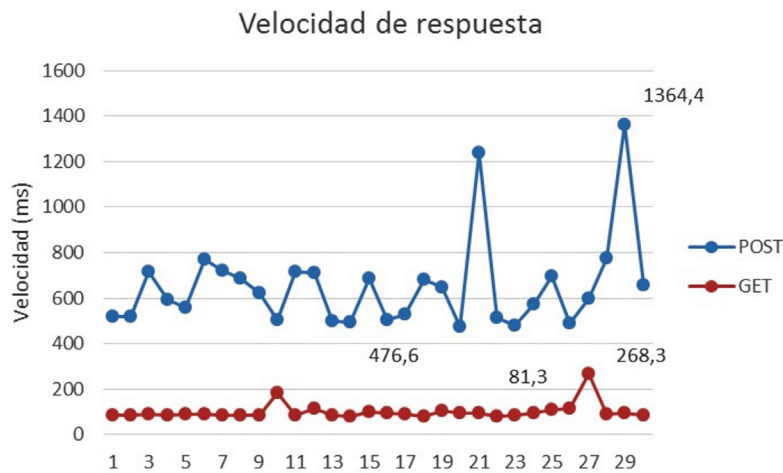


Figura 7. Velocidad de respuesta por parte del servidor

2.3. Activación del sistema de riego

Como se muestra en la figura 3, el primer objeto de respuesta se obtiene mediante una petición tipo GET y hace referencia al modo de activación, que en este caso es igual a 0 (modo automático); el segundo objeto de respuesta muestra que el sensor ha sido agregado correctamente con el método POST, e indica la activación de los actuadores (1 = encender; 0 = apagar).

Se analizaron las variaciones que presentan los valores de los sensores para que el sistema se active con una muestra de 90 datos.

En la figura 8 se muestran los valores de temperatura arrojados por los sensores para el periodo evaluado, los cuales se utilizaron para obtener los valores de ETO, usando la ecuación (2), dato que permitirá calcular al ETc del cultivo de cacao, aplicando la ecuación (1). En esta misma figura se pueden observar los valores de humedad del suelo para el periodo evaluado, mostrando que estos siempre se encuentran dentro del rango de los umbrales de CC y punto permanente de marchitez (PPM), con lo cual se verifica que el cultivo en ningún momento está bajo condiciones limitantes de agua.

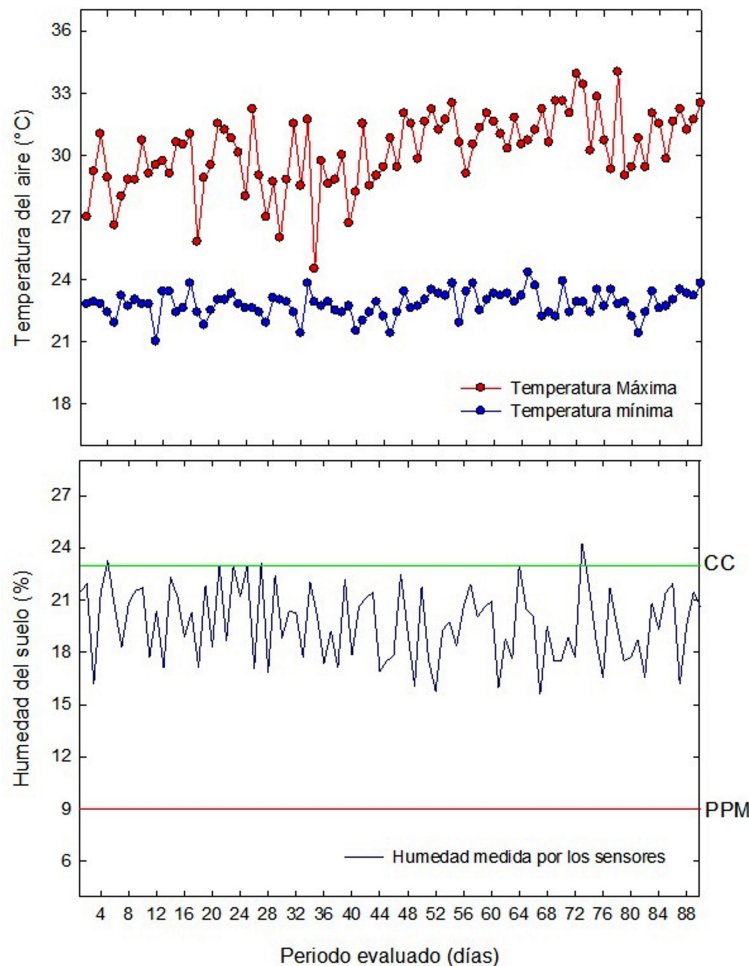


Figura 8. Valores de temperatura y humedad del suelo durante el periodo evaluado en Babahoyos, Ecuador

En un ensayo realizado en un pequeño huerto [17] se encontró que el funcionamiento de los sensores de humedad de bajo costo es aceptable, pues la entrega de valores se aproxima a los que normalmente entregan los sensores de alta precisión. Comprobando el control del riego se puede realizar de manera automática en tiempo real.

En la figura 9 se muestran los valores de lámina de evapotranspiración (ETc) del cacao (*Theobroma cacao*) durante el periodo evaluado, obtenida por el sistema, el cual ha recibido los datos del sensor de temperaturas y los envía hacia el servidor. Este último decodifica y procesa estos datos, calculando el valor de la ETc diaria, con la cual se realizan los cálculos de lámina de riego, que envían la orden para la apertura de las válvulas para la aplicación de la lámina de riego correspondiente.

Similares resultados se obtuvieron con un Sistema de Monitoreo Remoto desarrollado para el cultivo de arroz [18], mediante tecnología Arduino, el cual le ofrece al usuario información en tiempo real, completa, detallada y a distancia; el usuario también podrá recibir notificaciones sobre cualquier eventualidad en el sistema de riego para evitar poner en riesgo el cultivo.

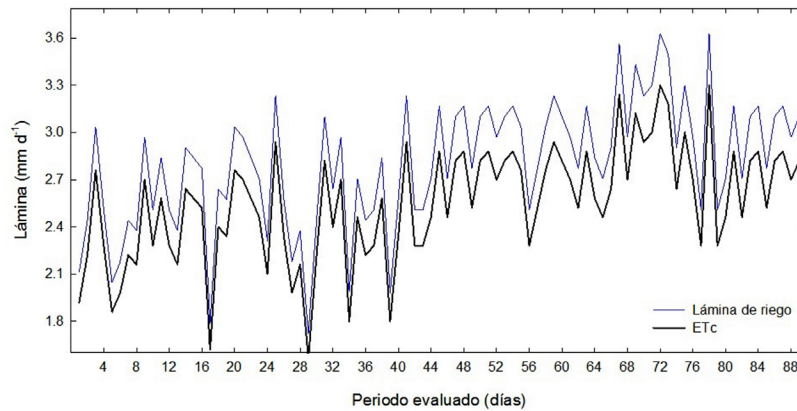


Figura 9. Lámina de riego y evapotranspiración (ETc) del cacao (*Theobroma cacao*) durante el periodo evaluado en Babahoyos, Ecuador

Al comparar los valores mostrados por las fluctuaciones de la humedad del suelo, producto del consumo por el cultivo, se observa correspondencia con la ETc. Ello evidencia que podrían ser usadas como una cercana referencia para conocer esas necesidades de riego y las láminas que necesitaría el cultivo para su adecuado desenvolvimiento.

Paralelamente, el sistema hace un chequeo con los valores de humedad del suelo: si estos valores no se encuentran dentro de los rangos establecidos (CC y PPM), el sistema emite una alarma para que el usuario busque la causa de esta alteración, ya que puede haber fugas u obstrucciones que impidan que el riego se esté aplicando de forma adecuada, esto es, cumple con lo expresado en [2]: la planta de cacao en niveles de contenido de humedad cercanos a capacidad de campo presenta buen desarrollo.

La evolución del contenido de humedad del suelo durante el periodo evaluado indica que el suministro de agua al suelo y, por ende, al cultivo fue adecuado, por lo cual se infiere que el uso de la ecuación HS generó valores ajustados a las necesidades reales del cultivo. De ahí la gran ventaja de este prototipo, pues HS solo necesita datos de temperatura, a diferencia de los prototipos presentados por [19] y [20], que utilizaron la ecuación de Penman-Monteith para el cálculo de la ET₀, la cual requiere una serie de datos de difícil consecución en la mayoría de las estaciones meteorológicas del país.

Durante el periodo evaluado, la cantidad de lluvia fue escasa, no significativa, por lo cual no fue considerada para los cálculos de lámina de riego en el periodo de estudio.

3. Conclusiones

- ◆ La utilización de la ecuación HS para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia se presenta como una excelente alternativa, ya que es un modelo sencillo y de fácil aplicación en lugares donde exista carencia de datos o estaciones meteorológicas, característica de los países en vías de desarrollo.

- ◆ El contenido de humedad del suelo se muestra como un índice muy adecuado para estimar las necesidades de agua del cultivo de cacao, bajo las condiciones climáticas del estudio.
- ◆ La implementación de Slim Framework para la implementación de la API en el servidor agiliza la codificación necesaria para el correcto funcionamiento del sistema.
- ◆ El diseño de la base de datos es flexible y escalable permite incrementar el número de bombas, electroválvulas, sectores de riego y cultivos, dependiendo de las necesidades del usuario.
- ◆ Por las pruebas realizadas con los datos, se determinó que el sistema permite la automatización del riego en forma oportuna y en cantidades adecuada, por lo cual puede ser utilizado en cualquier ambiente y cultivo.
- ◆ La interfaz gráfica dentro del aplicativo web se diseñó para que el usuario pueda tener acceso a los datos de cada uno de los sensores, interpretar de manera gráfica las fluctuaciones que presentan y finalmente una manipulación directa con los actuadores están instalados.

Referencias

- [1] V. Quiroz y F. Amores, "Rehabilitación de plantaciones tradicionales de cacao en Ecuador", *Manejo Integrado de Plagas*, n.º63, pp. 73-80, 2002.
- [2] J. García Lozano y L. Moreno Fonseca, "Respuestas fisiológicas de *Theobroma cacao* L. en etapa de vivero a la disponibilidad de agua en el suelo", *Acta Agronómica*, vol. 65, n.º 1, pp. 44-50, 2016. <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v65n1.48161>
- [3] R. B Ventura, V. M. Soto, A. J. Otiniano y P. L. Gratão, "Efeito do déficit hídrico e do aumento de temperatura sobre variáveis produtivas, fisiológicas e bioquímicas do 'Cacau' *Theobroma cacao* L.", *ARNALDOA*, vol. 26, n.º 1, pp. 287-296, 2019. <http://doi.org/10.22497/arnaldoa.261.26112>
- [4] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes y M. Smith, *Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Washington: FAO, 1998.
- [5] E. C. Martín, *Métodos para medir la humedad del suelo para la programación del riego*, University of Arizona, 2010. Disponible en:
- [6] Y. García-Orellana, J. J. Brito y J. López, "Evapotranspiración del cultivo cebolla en Quíbor, Venezuela: Medición con lisímetro y estimación con metodología de dos pasos FAO", *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología*, n.º 31, pp. 33-41, 2017.
- [7] H. Tabari, "Evaluation of reference cropevapotranspiration equations in various climates", *Water Res. Manage.*, vol. 24, n.º 10, pp. 2311-2337, 2010. <http://doi.org/10.1007/s11269-009-9553-8>
- [8] M. Cobaner, H. Citakoğlu, T. Haktanir, y O. Kisi, "Modifying Hargreaves-Samani equation with meteorological variables for estimation of reference evapotranspiration in Turkey", *Hydrol. Res.*, vol. 48, n.º 2, pp. 480-497, 2017. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.217>
- [9] E. E. Maeda, D. A. Wiberg y P. A. E. Pellikka, "Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya", *Appl. Geogr.*, vol. 31, n.º 1, pp. 251-258, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.05.011>
- [10] M. E. Moeletsi, S. Walker y H. Hamandawana, "Comparison of the Hargreaves and Samani equation and the Thornthwaite equation for

- estimating dekadal evapotranspiration in the Free State Province, South Africa”, *Phys. Chem. Earth*, n.º 66, pp. 4-15, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2013.08.003>
- [11] T. Raziei y L. S. Pereira, “Estimation of ETo with Hargreaves-Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran”, *Agr. Water Manage.*, n.º 121, pp. 1-18, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.12.019>
- [12] G. H. Hargreaves y Z. A. Samani, “Reference crop evapotranspiration from temperature”, *Appl. Eng. Agric.*, vol. 1, n.º 2, pp. 96-99, 1985. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- [13] R. López, W. Ojeda, A. P. López y E. A. Catalán, “Método de pulso de calor y flujo de savia para medir la transpiración en el cultivo del cacao”, RCHSZA, pp. 85-96, 2013.
- [14] U. O. Pinzón y A. J. Rojas, *Guía técnica para el cultivo del cacao*, Bogotá: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2012.
- [15] M. Vielhaber, D. Bergsjö y A. Catic, “Mechatronic systems engineering – theory and automotive practice”, en *Proc. International Design Conference, Design 2010*, Dubrovnik, pp. 975-984, May 2010.
- [16] W. R. Cervantes, L. A. Santana y B. A. Molina, “Arduino en la automatización de los sistemas de riego”, *Rev. Colomb. Comput.*, vol. 17, n.º 2, pp. 90-101, 2016. <https://doi.org/10.29375/25392115.2720>
- [17] A. A. Guijarro-Rodríguez, L. J. C. Torres, D. K. Preciado-Maila y B. N. Z. Manzur, “Sistema de riego automatizado con Arduino”. *Sistema, Revista Espacios*, vol. 39, n.º 37, 2018.
- [18] J. D. Quintero, M. D. B., Obando y A. Y. Ramírez, “Monitoreo remoto a sistemas de riego por bombeo eléctrico a cultivos de arroz en el departamento del Huila”, *Ingeniería y Región*, n.º 14, pp. 55-63, 2015. <https://doi.org/10.25054/22161325.693>
- [19] M. Castro P., F. M. Águila M., A. Quevedo N., S. Kleisinger, L. Tijerina Ch. y E. Mejía S., “Sistema de riego automatizado en tiempo real con balance hídrico, medición de humedad del suelo y lisímetro”, *Agric. Técnica Méx*, vol. 34, n.º 4, pp. 459-470, 2008.
- [20] O. Lugo E., A. Quevedo N., J. R. Bauer M., D. H. D. Valle P., E. Palacios V. y M. Águila M., “Prototipo para automatizar un sistema de riego multicultivo”, *Rev. Mexicana Cienc. Agríc.*, vol. 2, n.º 5, pp. 659-672, 2011.