

Manejo de cosecha y tecnología postcosecha

Artículo de investigación científica y tecnológica

Trazabilidad de los bultos de cacao mediante el sistema RFID, soportado en el uso de series de tiempo bajo la arquitectura del IoT

Traceability of Cocoa Packages Through the RFID System, Supported by the Use of Time Series Under IoT Architecture

 Juan Carlos Vesga Ferreira ^{1*}  Martha Fabiola Contreras Higuera ¹
 José Antonio Vesga Barrera ²

¹ Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Bucaramanga, Colombia.

² Corporación Universitaria de Ciencia y Desarrollo-Uniciencia, Bucaramanga, Colombia.

*Autor de correspondencia: Juan Carlos Vesga Ferreira. Universidad Nacional Abierta y a Distancia, carrera 27 # 40-43, Sotomayor, Bucaramanga, Santander, Colombia. juan.vesga@unad.edu.co

Recibido: 26 de enero de 2022
Aprobado: 13 de diciembre de 2022
Publicado: 8 de febrero de 2023

Editor temático: Rudi Radrigán Ewoldt, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

Para citar este artículo: Vesga Ferreira, J. C., Contreras Higuera, M. F., & Vesga Barrera, J. A. (2023). Trazabilidad de los bultos de cacao mediante sistema RFID, soportado en el uso de series de tiempo bajo arquitectura del IoT. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 24(1), e2911.
https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num1_art:2911

Resumen: Diversas organizaciones han expresado la necesidad de contar con un sistema de base tecnológica para monitorear y gestionar la trazabilidad del cacao durante el proceso de fabricación del chocolate. Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue desarrollar un sistema rfid (*Radio Frequency Identification*) bajo la arquitectura del IoT, que realiza la trazabilidad de los bultos de cacao dentro del proceso de producción de chocolate mediante el uso de series de tiempo. Para ello, se diseñó un dispositivo capaz de realizar registros y consultas en un servidor donde se puede verificar la información de cada bulto de cacao, al momento de ser recibido y almacenado en el centro de acopio, mediante una arquitectura cliente/servidor y una tecnología rfid. Adicionalmente, se incorpora un desarrollo web con capacidad de realizar el proceso de análisis y modelamiento de las condiciones ambientales durante el almacenamiento del cacao, soportado en el uso del modelo de Holt-Winters. El sistema desarrollado de bajo costo realiza el registro, el control y el monitoreo de los procesos relacionados con la trazabilidad del cacao en la gestión del almacenamiento de manera eficiente, en términos de: contenido de humedad, peso, impurezas, granos defectuosos, granos bien fermentados, entre otros. Este modelo de Holt-Winters propuesto puede ser considerado como una herramienta de predicción para la temperatura y la humedad relativa, para mejorar la trazabilidad del cacao a un nivel de ajuste superior a 0,9; bajo error estándar de estimación y un nivel de confianza del 95 %.

Palabras clave: almacenamiento de semillas, arduino, control de calidad, gestión de datos, modelo Holt-Winters, humedad relativa, temperatura.

Abstract: Various organizations have expressed the need to have a technology-based system to monitor and manage the traceability of cocoa during the chocolate manufacturing process. Therefore, the objective of this study was to develop an RFID system under IoT architecture, which allows traceability of cocoa packages within the chocolate production process through the use of Time Series. To do this, a device capable of registering and consulting the information related to each package of cocoa at the time it is received and stored in the collection center was designed through a client/server architecture and RFID (Radio Frequency Identification). Additionally, it incorporates a web development with the capacity to carry out the process of analysis and modeling of environmental conditions during cocoa storage supported by the use of the Holt-Winters model. The low-cost system developed made it possible to efficiently record, control and monitor processes related to cocoa traceability in storage management, in terms of: moisture content, weight, impurities, defective beans, well-fermented beans, among others. Additionally, the proposed Holt-Winters model can be considered as a prediction tool for temperature and relative humidity, allowing to improve the cocoa traceability process, reaching adjustment levels higher than 0.9, accompanied by a very low standard error. estimation and with a confidence level of 95 %.

Keywords: Arduino, Data management, Holt-Winters Model, Quality control, Relative humidity, Seed Storage.



Introducción

El almacenamiento del grano de cacao es considerado, según Andrade et al. (2019), como un punto de control de gran importancia en el proceso de trazabilidad, debido a que en él pueden presentarse fenómenos de deterioro que afectan su calidad. Durante el tiempo de almacenamiento del grano ocurren variaciones de temperatura y humedad relativa que provocan pérdidas en las propiedades fisicoquímicas y organolépticas (color, olor, sabor) de los granos, a causa de su capacidad higroscópica, facilitando el crecimiento de hongos.

Beg et al. (2017) expresan que todo grano o semilla almacenado está sujeto a cambios ambientales. Estos cambios pueden ser de índole física, biológica, química o técnica. Los factores físicos tienen una influencia decisiva en el almacenamiento de los granos. Cuando las condiciones ambientales son apropiadas, los granos se podrán almacenar por largos periodos de tiempo sin que se presenten problemas y cuando las condiciones son adversas, el deterioro puede estar presente en el corto tiempo, generándose la descomposición del grano e incluso su destrucción total. Por tal razón, Afoakwa (2014) menciona que el tiempo máximo recomendado de almacenamiento es de tres meses, sin embargo, esto no siempre se cumple, debido a que este tiempo puede ser ampliado como resultado de la relación de los tiempos de cosecha del cacao. Una vez transcurrido este tiempo, los granos pueden comenzar a deteriorarse, afectando con ello a los agricultores en el precio de venta y a la industria chocolatera en la calidad de los productos derivados de este alimento.

Para satisfacer las necesidades del comprador, Muñoz et al. (2019) explican que los granos de cacao deshidratado deben cumplir con los criterios de calidad, lo que implica que pasen por un adecuado proceso de fermentación y deshidratación entre el 7 % y 8 % de humedad, libre de olores, cuerpos extraños y, a su vez, el peso de cada grano no debe ser inferior a 1 gramo. En Colombia, Fedecacao (2020) menciona que la calidad del grano se rige bajo la norma técnica Icontec 1252 del 2003, donde se especifican los criterios de calidad de acuerdo con los estándares internacionales. A su vez, se detallan los parámetros físicos y químicos aceptados, tales como: humedad, grasa, Ph, índice del grano (permite determinar su peso promedio) e índice de la mazorca o número de mazorcas que se necesitan para obtener 1 kg de cacao hidratado, entre otros.

Żyżelewicz et al. (2018) describen al cacao como un fruto vivo que necesita ser almacenado en espacios adecuados que garanticen su permanencia en el tiempo. Por ello, los productores usan sacos elaborados con fibras naturales tales como: fique, yute o sisal, los cuales permiten que el grano respire y mantenga su humedad, de lo contrario, si son almacenados en sacos cerrados, la humedad interna del grano contribuye a la generación de moho. Adicionalmente, los granos de cacao durante su almacenamiento, también son susceptibles a otro tipo de plagas, tales como la palomilla, los gorgojos y los ácaros.

Para evitar esto, un centro de acopio debe ser ventilado y estar construido en obra limpia (suelo de cemento y paredes de ladrillo o bloque de cemento), con el fin de minimizar la proliferación de insectos. El ambiente debe ser controlado y se deben hacer evaluaciones periódicas de la humedad, debido a que estas pueden tener un comportamiento dinámico, generando condiciones de humedad que permitan la aparición de rocío, las cuales mediante un sistema que

tenga una arquitectura del IoT podrían llegar a ser controladas y monitoreadas (Vesga et al., 2018). Por tal razón, es recomendable que la humedad relativa de la bodega sea inferior al 70 %, tal como lo expresa Beg et al. (2017).

Figuroa et al. (2019) mencionan que en los sistemas tradicionales de manejo de poscosecha de granos, la temperatura es a menudo poco controlada, lo cual podría afectar la calidad del grano durante el proceso de almacenamiento. La importancia de la temperatura radica en su efecto sobre factores biológicos como microorganismos e insectos. Los microorganismos (hongos) que afectan tradicionalmente al grano se desarrollan rápidamente a temperaturas mayores a 25 °C, con un rango óptimo entre 28 °C y 32 °C. Cuando estos organismos están en etapa de desarrollo, la temperatura del microclima irá en aumento debido a su metabolismo, provocando la descomposición del grano. Los hongos mueren cuando la temperatura del grano está fuera del margen en el que se afecta su crecimiento, por tal razón es muy importante mantener el grano a temperaturas inferiores al valor óptimo de crecimiento, a fin de minimizar el desarrollo de microorganismos.

El proceso de almacenamiento es considerado como una etapa fundamental en la trazabilidad del grano de cacao, debido a que durante este tiempo se puede presentar deterioro, pérdidas en las propiedades fisicoquímicas y organolépticas, tal como lo expresa Nair (2021), afectando de manera significativa la calidad de los granos como resultado de las variaciones de temperatura y humedad relativa en el ambiente, en donde el grano podría no solo absorber humedad como resultado de su capacidad higroscópica, sino que además se estarían generando las condiciones para la proliferación de hongos. Motivo por el cual, es de vital importancia mantener un control y un monitoreo de temperatura y humedad relativa, a fin de minimizar cualquier tipo de afectación que ponga en riesgo la integridad y la calidad del grano durante su almacenamiento en bodega.

En vista de lo anterior, el objetivo consistió en desarrollar un sistema rfid bajo una arquitectura del IoT, con capacidad para realizar el registro y la consulta de la información de cada bulto en el momento de ser recibido y almacenado en el centro de acopio, a través del cual no solo se busca mejorar la trazabilidad de los bultos de cacao dentro del proceso de producción de chocolate, sino que además el sistema está acompañado del modelo de Holt-Winters como estrategia para predecir el comportamiento de la temperatura, la humedad relativa y la temperatura de punto de rocío que podrían estar presentes en el proceso de almacenamiento del grano de cacao, incorporando el uso de técnicas de análisis soportadas en series de tiempo, facilitando con ello un mejor control y monitoreo de la calidad del grano durante su estancia en bodega.

Materiales y métodos

Descripción general del prototipo propuesto

La arquitectura cliente/servidor se define como un modelo para el desarrollo de sistemas de información en el que las transacciones se dividen en procesos independientes que cooperan

entre sí para intercambiar información, servicios o recursos. Se denomina cliente a aquel elemento *hardware* o *software* que solicita los recursos y, por otro lado, se encuentra el servidor, quien es el responsable de responder a las solicitudes realizadas por el cliente, facilitando con ello un proceso de interacción constante, permitiendo el acceso a los recursos que el servidor administra (Magaly et al., 2020).

Con base en esta definición, se podría decir que el sistema IoT propuesto describe una arquitectura cliente/servidor, a través de la cual el prototipo de *hardware*, que permite realizar la lectura de los *tag* rfid que se encuentran adheridos en cada saco de cacao, cumple el rol de cliente y, por otro lado, está el servidor local, en el cual se encuentra la base de datos con toda la información relacionada con la trazabilidad de cada saco, quien cumpliría el rol de servidor en la arquitectura propuesta. Adicionalmente, el servidor cuenta con un *software* que fue desarrollado para un entorno web, a través del cual se podrá hacer el registro de toda la información relacionada con las características particulares de cada bulto de cacao en el momento de su ingreso a bodega, para su posterior consulta y seguimiento, ya sea a través del prototipo de *hardware* del IoT, mediante la lectura del *tag* rfid, ya que a través de la red inalámbrica se realiza el proceso de consulta de información al servidor, o a través del *software* desarrollado en el servidor, facilitando con ello un mayor control y seguimiento a cada bulto durante su estancia en bodega, a fin de mejorar el proceso de trazabilidad del bulto en comparación con las prácticas tradicionales. En la figura 1 se presenta el modelo de la arquitectura cliente-servidor para el sistema propuesto.

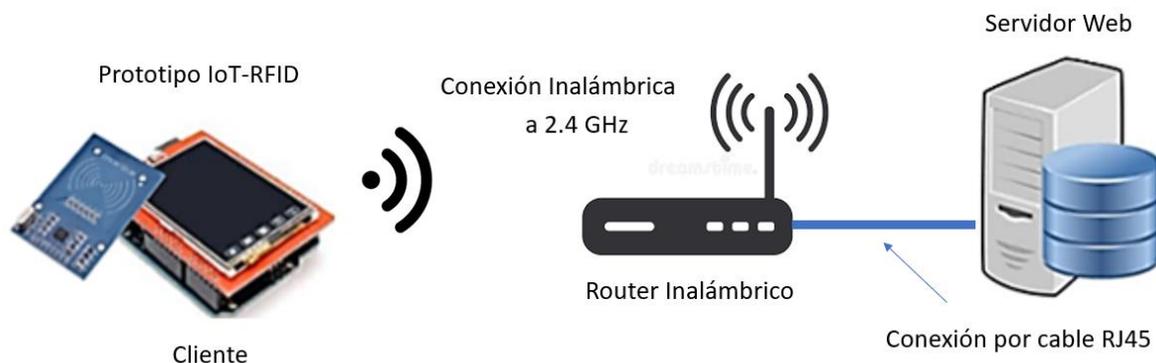


Figura 1. Arquitectura de cliente-servidor para el sistema propuesto

Fuente: Elaboración propia

Para el proceso de registro y almacenamiento de la información, se implementó un servidor de base de datos, soportado en MySQL 5.7, a través del cual será configurada la base de datos del sistema, la cual permitirá almacenar los datos generales y la información más importante de cada bulto de cacao. En la figura 2 se presenta el diagrama de bloques en el cual se describen los módulos que forma parte del prototipo de *hardware* IoT-rfid, el cual desempeña el rol del cliente dentro de la arquitectura propuesta para el sistema.

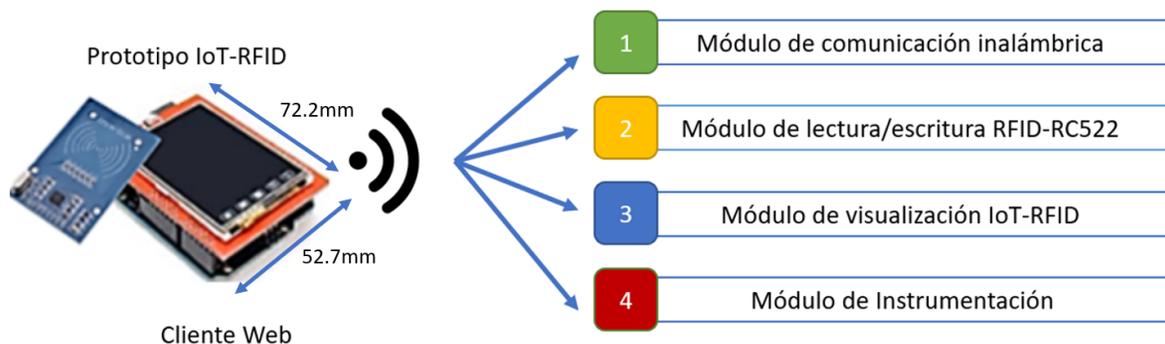


Figura 2. Diagrama de bloques en el cual se describen los módulos que forman parte del prototipo de *hardware* IoT-rfid

Fuente: Elaboración propia

Módulo de comunicación inalámbrica

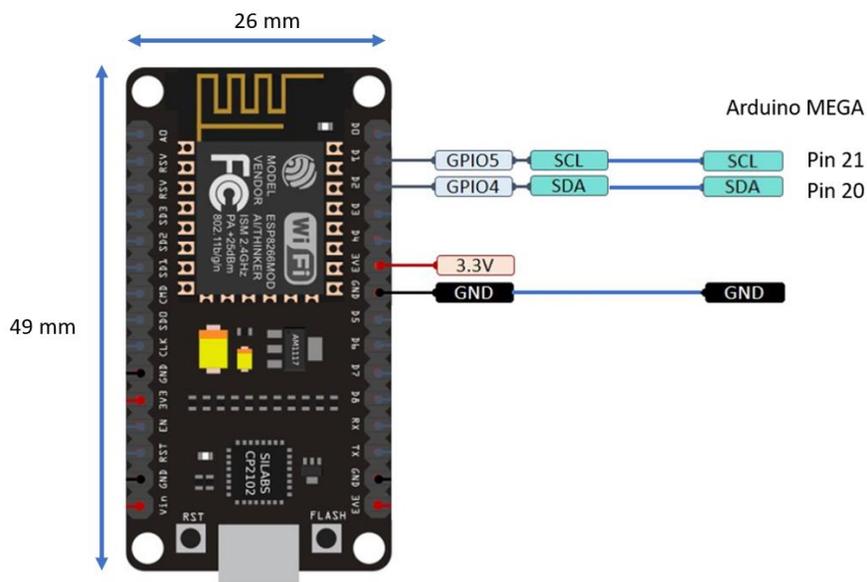


Figura 3. Esquema de conexión entre el NodeMCU ESP8266 y el microcontrolador Arduino Mega para establecer una comunicación inalámbrica con el *router*

Fuente: Elaboración propia

Para establecer procesos de comunicación entre el terminal rfid y el servidor web mediante protocolo tcp/ip, se incorporó un módulo de comunicación inalámbrica NodeMCU ESP8266, el cual permite tener acceso a la base de datos a través de la red inalámbrica soportada en el estándar 802.11n a una frecuencia de 2.4 GHz, facilitando aspectos de movilidad, ubicuidad y portabilidad del prototipo desarrollado. El proceso de comunicación entre el microcontrolador Arduino Mega y el NodeMCU se realiza mediante el protocolo de comunicación I2C. Para el desarrollo del código fuente que permite el uso y la interacción con el módulo de comunicación inalámbrica, se utilizaron las librerías ESP8266WiFi.h y ESPAsyncWebServer.h para la configuración del NodeMCU ESP8266 como cliente web y la librería Wire.h para establecer la

comunicación con el Arduino a través del protocolo I2C. En la figura 3 se describe el esquema de conexión entre el NodeMCU y el microcontrolador.

Etiquetas RFID

Para el desarrollo del sistema propuesto, se consideró el uso de un *tag* tipo Mifire Classic, que pueden ser encontradas comercialmente en forma de tarjetas o llaveros con capacidades de almacenamiento de memoria Eeprom de 1Kb y 4Kb. Básicamente, este tipo de *tag* está conformado por dos elementos electrónicos: un microcontrolador especializado conocido como ‘chip’ y una antena para la trasmisión-recepción de información a una frecuencia de 13.56 Mhz, acorde con el estándar empleado en los sistemas rfid (Vesga et al., 2018; Gibbs & González, 2017).



Figura 4. Apariencia de un *tag* rfid tipo llavero y forma de adherirlo a un saco de cacao
Fuente: Elaboración propia

En la figura 4 se ilustra la apariencia física de los *tag* Mifire en forma de llavero, acompañados de la forma en la cual estos deben ser adheridos a los sacos de cacao. Para el caso particular, este es el modelo de llavero utilizado para el proyecto, ya que permite adherirse con facilidad a cada bulto de cacao.

Módulo de lectura/escritura RFID-RC522

Para realizar la lectura de cada uno de los *tag*, se hizo uso de un módulo lector rfid-RC522, el cual está basado en el circuito integrado MFRC522 de nxp, que es un ic especializado en “comunicación sin contacto”, con capacidad de soportar etiquetas iso/iec 14443 A o Mifare. El módulo incluye una antena para la lectura/escritura junto con toda la arquitectura necesaria para establecer comunicación con los *tag* (Sierra et al., 2018).

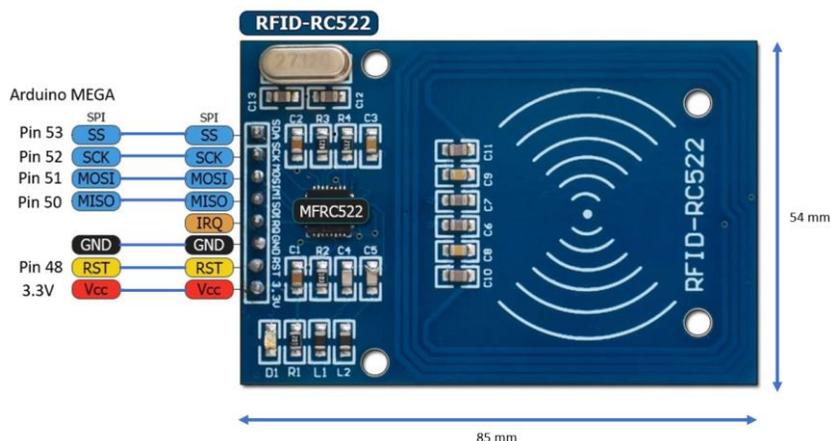


Figura 5. Esquema de conexión del módulo rfid-RC522 y el microcontrolador Arduino Mega para establecer procesos de lectura/escritura de los *tag* rfid
Fuente: Elaboración propia

En la figura 5 se presenta el esquema de interconexión entre el módulo rfid-RC522 y el microcontrolador, a través del protocolo de comunicación spi para establecer procesos de lectura/escritura de los *tag* rfid. Para el desarrollo del código fuente que permite el uso e interacción con el módulo rfid-RC522, se utilizaron las librerías SPI.h y MFRC522.h como herramientas de programación en el Arduino para las diferentes funciones que fueron requeridas durante la construcción del prototipo.

Modulo de visualización IoT-RFID

Como interfaz visual en el prototipo de *hardware* IoT-rfid, se hizo uso de una pantalla táctil lcd de 2.4”, la cual permitirá visualizar la información que será enviada desde el servidor web, relacionada con el bulto de cacao de interés. Para el desarrollo del código fuente que permite el uso e interacción de la pantalla seleccionada, se utilizaron las librerías Adafruit_GFX.h y Adafruit_TFTLCD.h como herramientas de programación en el Arduino, para las diferentes funciones que fueron requeridas durante la construcción del prototipo. En la figura 6 se presenta la apariencia física de la pantalla tft Touch 2.4” que fue utilizada para el desarrollo del prototipo.

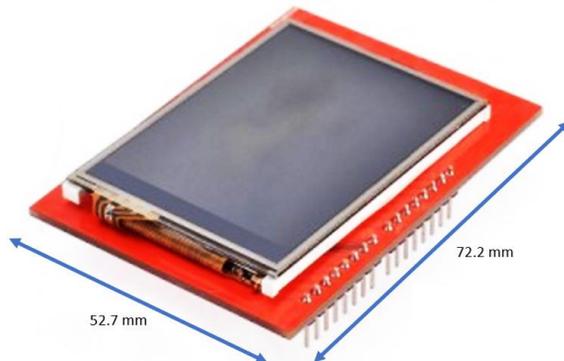


Figura 6. Pantalla TFT Touch 2.4”
Fuente: ElectrotekMega, 2014

Módulo de instrumentación que permite medir la temperatura y la humedad relativa en el interior de un saco de cacao y en el ambiente

El módulo de instrumentación que fue desarrollado en el prototipo rfid-IoT con capacidad para medir la temperatura y la humedad relativa, tanto en el interior como en el exterior de un saco de cacao que sea de interés durante el proceso de monitoreo, está compuesto por un sensor de temperatura (PT100) y un sensor de humedad relativa (DTH11), los cuales están conectados al microcontrolador Arduino Mega. A continuación, se describe el funcionamiento y las especificaciones técnicas de cada uno de ellos:

Sensor de temperatura PT100

El sensor de temperatura PT100 es un rtd (*resistance temperature detector*), el cual es un detector de temperatura resistivo, cuyo principio de funcionamiento está relacionado con la variación de la resistencia de un conductor en función de su temperatura. El sensor PT100 consiste en un alambre de platino encapsulado que describe una resistencia de 100Ω a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (característica principal que da nombre al sensor), ofreciendo a su vez una alta linealidad de cambio resistivo en función de la temperatura (Wang et al., 2019). Para el caso particular, se hará uso de un sensor PT100 de dos hilos, teniendo en cuenta que existen otras versiones para el sensor PT100 de tres y cuatro hilos de conexión. Una de las principales características de los rtd, en general, es que son más precisos que las termocuplas, especialmente en aplicaciones que requieran el monitoreo de temperaturas bajas comprendidas en el rango entre $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Para el montaje del circuito se consideró el uso del módulo MAX31865, el cual es un circuito acondicionador de señal que integra la electrónica necesaria para conectar de forma óptima un sensor PT100 de dos o tres hilos con Arduino, mediante una interfaz digital spi para la lectura de información. En la figura 7 se presenta la apariencia física del módulo MAX31865 y del sensor de temperatura PT100, los cuales fueron utilizados durante la campaña de muestreo.

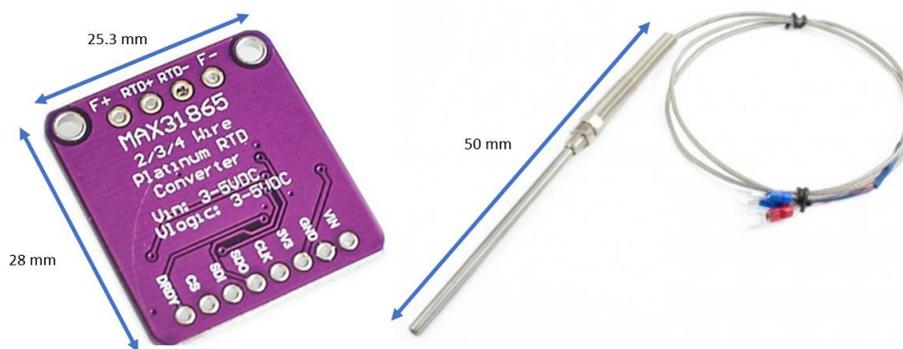


Figura 7. Apariencia física del módulo MAX31865 y del sensor de temperatura PT100

Fuente: Elaboración propia

El módulo transmisor MAX31865 permite obtener de forma sencilla y confiable la medición de temperatura del sensor rtd PT100. El módulo se encarga de realizar la lectura de resistencia del sensor PT100 y convertir esta señal analógica en un valor digital que pueda ser interpretado y

procesado por un Arduino. El módulo MAX31865 posee un conversor adc delta-sigma de precisión con una resolución de 15 bits, a través del cual es posible alcanzar una sensibilidad de 0,03125 °C. A su vez, Arduino dispone de la librería Adafruit MAX31865, la cual fue considerada en el código fuente como mecanismo de interacción con el módulo para la lectura de la temperatura a través del protocolo spi. Es importante mencionar que para hacer uso del módulo MAX31865 con sensores PT100 de dos hilos, es necesario soldar los *pads* etiquetados como “2/3 Wire” y “2 Wire”. Adicionalmente, el módulo está configurado por defecto para sensores PT100, con un valor de resistencia de referencia (R_{ref}) de 430 Ohm y con una precisión de 0,5 °C.

La variación de la resistencia en función de la temperatura puede ser expresada de manera polinómica utilizando la ecuación (34) (Wang et al., 2019):

$$R = R_o(1 + \alpha\Delta T) \quad (1)$$

Donde,

R_o : resistencia a la temperatura de referencia

ΔT : desviación de temperatura

α : coeficiente de temperatura del conductor especificado a 0 °C, interesa que sea de gran valor y constante con la temperatura

Los materiales empleados para la construcción de sensores rtd suelen ser conductores tales como el cobre, el níquel o el platino. Para el caso particular del sensor PT100 (platino), los parámetros de referencia requeridos son: $R_o = 100\Omega$ a 0 °C con un coeficiente $\alpha = 0,00385 K^{-1}$. En la tabla 1 se presentan los valores sugeridos por el fabricante para ser considerados durante el proceso de calibración del sensor.

Tabla 1. Valores sugeridos por el fabricante para ser considerados durante el proceso de calibración del sensor PT100

Temperatura (°C)	0	20	30	40	60	80	100
Resistencia (Ω)	100	107,79	111,55	115,54	123,1	130,87	138,50

Fuente: Elaboración propia

Sensor DTH11 para la medición de Humedad Relativa

El DHT11 es un sensor de temperatura y humedad con salida digital calibrada, el cual cuenta con un rango de medición de humedad relativa entre el 20 % y el 90 %, con un error de $\pm 5\%$. Es compatible con Arduino y cuenta con excelente calidad, respuesta rápida, capacidad anti-interferencia, alta fiabilidad y excelente estabilidad a largo plazo, entre otras características. Utiliza una interfaz de serie de un solo hilo, la cual permite hacer una integración del sensor con el Arduino de forma rápida y sencilla. En la figura 8 se presenta el circuito que

fue utilizado para la medición de temperatura y humedad relativa en el ambiente y en el interior de un saco de cacao.

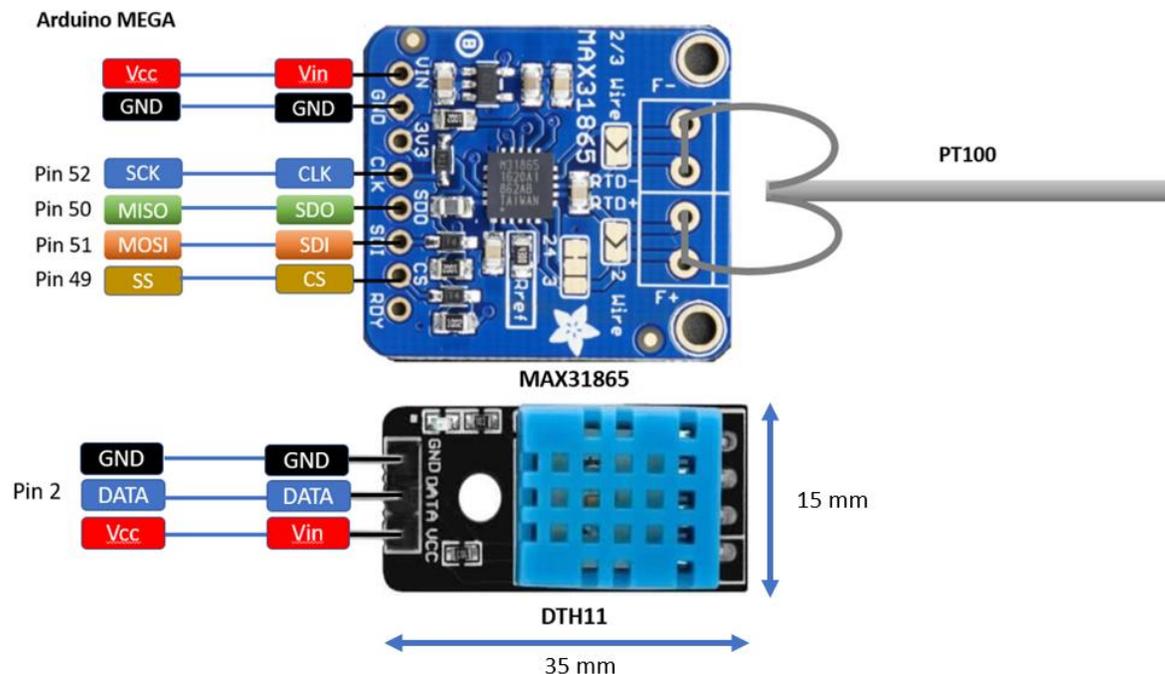


Figura 8. Circuito utilizado para la medición de temperatura y humedad relativa en el ambiente y en el interior de un saco de cacao

Fuente: Elaboración propia

Para el desarrollo del código fuente se utilizaron las librerías DTH.h y Adafruit_MAX31865.h como herramientas de programación en el Arduino, para la medición de temperatura y humedad relativa acorde a las referencias de los sensores que fueron utilizados en prototipo: DTH11 y PT100, respectivamente.

Series de Tiempo

Germán et al. (2016) expresan que los pronósticos o las predicciones son esenciales en cualquier proceso relacionado con la toma de decisiones. La calidad de los pronósticos está estrechamente relacionada con información que puede ser extraída y analizada a partir de datos históricos. El análisis de series de tiempo es un método cuantitativo utilizado para identificar patrones en los datos que fueron obtenidos durante el tiempo en el cual ha sido objeto de estudio alguna variable en particular, como en Lambert et al. (2017). En consecuencia, el análisis de series de tiempo permite administrar la incertidumbre relacionada con los eventos futuros, tal como lo manifiesta Wu & He (2021).

En Yang et al. (2017), una serie temporal se define como una secuencia de N observaciones (ordenadas) y equidistantes cronológicamente sobre una característica (univariante o escalar) o sobre múltiples características (multivariante o vectorial) de una unidad observable en diferentes momentos. Su representación matemática es la siguiente:

Serie Univariante

$$Y_1, Y_2, \dots, Y_N; [Y_t]_{t=1}^N; (Y_t: t = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

Donde Y_t es la observación t ($1 \leq t \leq N$) de la variable objeto de estudio (Temperatura o Humedad Relativa) y N es el número total de observaciones de la serie.

$$Y_t = [Y_1, Y_2, \dots, Y_N]' \text{ de orden } Nx1 \quad (3)$$

Serie multivariante

$$Y_1, Y_2, \dots, Y_N; [Y_t]_{t=1}^N; (Y_t: t = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

Donde,

$$Y_t = [Y_{t1}, Y_{t2}, \dots, Y_{tM}]' \text{ de orden } NxM \text{ con } M \geq 2$$

Las series de tiempo hacen referencia a datos estadísticos que se recopilan, observan o registran en forma periódica (diario, semanal, semestral, anual, entre otros), los cuales surgen como producto de la medición de una o más variables durante largos periodos de tiempo.

Componentes de la serie de tiempo

Wei (2013) expresa que una serie de tiempo puede estar conformada por cuatro tipos de componentes básicos de variación, los cuales, al superponerse, describen el comportamiento observado en la variable objeto de análisis. Los cuatro componentes son: tendencia secular, variación estacional, variación cíclica y variación irregular.

- *Tendencia secular*: este tipo de tendencia surge como resultado de factores a largo plazo, caracterizado por un patrón gradual y consistente de las variaciones de la propia serie, reflejando un crecimiento o atenuación de la misma. Este componente está relacionado con el parámetro (T_t) del modelo de Holt-Winters.
- *Variación estacional*: este componente de la serie de tiempo representa la variabilidad que puede presentar la variable de interés a lo largo del año y que puede estar asociada a fenómenos relacionados con las estaciones (invierno, verano, otoño y primavera), de allí su nombre. Este componente también está conectado con el parámetro (S_t) del modelo de Holt-Winters.
- *Variación cíclica*: representa los cambios cíclicos y periódicos que pueden presentar las series de tiempo, alternando incrementos y descensos en torno a la línea de tendencia, la cual se mantiene después de que se han eliminado las variaciones o las tendencias estacionales e irregulares. Este componente está relacionado con el parámetro (S) o la periodicidad del modelo de Holt-Winters.

- *Variación irregular*: este tipo de variación corresponde a factores presentes en periodos cortos de tiempo, imprevisibles y no recurrentes que afectan a la serie de tiempo. En otras palabras, describen el componente de variabilidad aleatoria de la serie, el cual es impredecible sobre la serie de tiempo. Este componente obedece al comportamiento aleatorio que está presente en la serie de tiempo y que busca ser suavizado a través del modelo de Holt-Winters, propuesto a fin de identificar una mayor probabilidad de caracterizar su comportamiento en eventos futuros, facilitando con ello la posibilidad de ser pronosticado.

Modelo de suavización exponencial Holt-Winters

Para el desarrollo del proyecto se consideró el uso del modelo de Holt-Winters, el cual permite analizar series de tiempo univariantes que contienen factores de tendencia o estacionalidad, involucrando un enfoque de suavización exponencial con métodos analíticos y patrones aditivos y multiplicativos.

Para el caso particular se consideró el uso del Modelo Holt-Winters multiplicativo, al tener en cuenta que el suavizado exponencial es uno de los métodos de predicción de series de tiempo, el cual es recomendado cuando los valores de las series temporales siguen una tendencia gradual y presentan un comportamiento estacional, en el cual los valores siguen un patrón cíclico repetido a lo largo de un número determinado de periodos de tiempo, y a su vez presupone que, a medida que se incrementan los datos, también se incrementa el patrón estacional. Mejía (2019) manifiesta que la suavización de forma multiplicativa se fundamenta en el cálculo de cuatro componentes:

- Serie suavizada exponencialmente o nivel estimado

$$A_t = \alpha \frac{X_t}{S_{t-s}} + (1 - \alpha)(A_{t-1} + T_{t-1}) \quad \alpha \in (0,1) \quad t = \{1,2,3 \dots\} \quad (5)$$

- Estimación de Tendencia

$$T_t = \gamma(A_t - A_{t-1}) + (1 - \gamma)T_{t-1} \quad \gamma \in (0,1) \quad (6)$$

- Estimación de estacionalidad

$$S_t = \delta \frac{X_t}{A_t} + (1 - \delta)S_{t-s} \quad \delta \in (0,1) \quad (7)$$

- Predicción de m periodos en el futuro

$$\hat{X}_{t+m} = (A_t + mT_t)S_{t+m-s} \quad \delta \in (0,1) \tag{8}$$

Donde,

A_t : Valor de suavización para el nivel de la serie en el periodo t

α : Constante de suavización exponencial para nivel

X_t : Valor real de la serie de tiempo en el periodo t

T_t : Componente de tendencia de la serie para el periodo t

γ : Constante de suavización exponencial para la tendencia

S_t : Componente estacional de la serie para el periodo t

S_{t-s} : componente estacional de la serie para el periodo $t-s$

δ : Constante de suavización exponencial para la estacionalidad

s : Longitud de tiempo de la estacionalidad ($s=12$ *anual*)

m : Periodos futuros a predecir

\hat{X}_{t+m} : Predicción de Holt-Winters para el periodo $t+m$

Para calcular las condiciones iniciales del modelo S_o, A_o y T_o se hace uso de las siguientes expresiones:

$$D_1 = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s X_t \tag{9}$$

$$D_2 = \frac{1}{s} \sum_{i=s+1}^{2s} X_t \tag{10}$$

$$T_o = \frac{D_2 - D_1}{s} \tag{11}$$

$$A_o = \frac{D_1 - \left[\frac{s+1}{2} \right] T_o}{s} \tag{12}$$

$$S_o = \frac{S_s + S_{2s}}{2} \quad (13)$$

Estimación de α , γ y δ e indicadores de error del modelo

En Hudson y Cohen (2016) se menciona que los coeficientes de ponderación α , γ y δ pueden ser calculados estableciendo valores iniciales y, posteriormente, mediante un proceso de optimización iterativo se van modificando hasta alcanzar un ajuste adecuado. La minimización del error cuadrático medio (msd) o el error estándar de estimación ($\hat{\sigma}$) son utilizados comúnmente como objetivo de optimización. Estos indicadores sirven para comparar la efectividad del modelo utilizado, como en Yang et al. (2017). A su vez, la precisión de la predicción es un criterio muy importante para evaluar la validez de la predicción.

Registro histórico de valores de temperatura y humedad relativa

Al tener en cuenta que el prototipo se encuentra en su etapa de desarrollo y considerar que para realizar una estimación preliminar del modelo propuesto, para la predicción de las condiciones ambientales en bodega, era necesario contar con información histórica de al menos dos años, se adoptó como criterio preliminar de análisis el obtener la información histórica relacionada con el comportamiento de la temperatura, la humedad relativa, el nivel de precipitación y los niveles de intensidad del sol durante el año de diversos municipios a nivel nacional e internacional.

Con el fin de evaluar el modelo propuesto de Holt-Winters, el sistema fue alimentado con los datos históricos de temperatura y humedad relativa promedio mensual correspondientes a los años 2020 y 2021, los cuales fueron tomados de la página Weather Atlas (s. f.), específicamente para el municipio de Floridablanca, en el cual se encuentra la fábrica y, a su vez, la bodega de almacenamiento de la empresa Chocolate Girones. Es importante mencionar que, aunque idealmente se busca una lectura de los valores de temperatura y humedad relativa en bodega y en el interior de los sacos de cacao a diario, para esta primera aproximación se consideran válidos los valores que fueron adoptados a nivel promedio mensual, ya que el objetivo de la prueba preliminar es validar si el modelo propuesto puede ajustarse al comportamiento dinámico de las variables objeto de estudio con adecuados niveles de ajuste.

En vista de lo anterior, en este primer análisis se consideraron valores tomados de un histórico general del municipio y no valores de temperatura y humedad relativa en bodega, tal como se hizo mención anteriormente, debido a que el proyecto se encuentra en etapa de preliminar, acompañado a su vez de las restricciones complementarias que se han establecido en diversos sectores como resultado de COVID-19; no obstante, en un futuro manuscrito se espera que pueda ser registrada una cantidad de información significativa en bodega *in situ*, mediante el uso de sensores de humedad relativa y temperatura que se encuentran disponibles en el prototipo de rfid-IoT que fue desarrollado.

Tabla 2. Temperatura promedio y humedad relativa por mes y años del 2020 y el 2021, en el municipio de Floridablanca, Santander

Mes	Temperatura [°C]		Humedad relativa [%]	
	2020	2021	2020	2021
Ene	25 ± 1	24,7 ± 1	70,00 ± 2	69,00 ± 2
Feb	25,5 ± 1	25,3 ± 1	68,00 ± 2	68,00 ± 2
Mar	24,6 ± 1	24,1 ± 1	76,00 ± 2	76,00 ± 2
Abr	23,3 ± 1	23,3 ± 1	82,00 ± 2	82,00 ± 2
May	23,6 ± 1	22,8 ± 1	84,00 ± 2	84,00 ± 2
Jun	23,5 ± 1	23,2 ± 1	82,00 ± 2	82,00 ± 2
Jul	23,8 ± 1	23,3 ± 1	81,00 ± 2	80,00 ± 2
Ago	23,6 ± 1	23,3 ± 1	82,00 ± 2	81,00 ± 2
Sep	23,8 ± 1	22,9 ± 1	83,00 ± 2	82,00 ± 2
Oct	23,1 ± 1	22,5 ± 1	84,00 ± 2	84,00 ± 2
Nov	23 ± 1	22,4 ± 1	85,00 ± 2	84,00 ± 2
Dic	24,2 ± 1	23,5 ± 1	75,00 ± 2	75,00 ± 2

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 2 se encuentra consolidada la información correspondiente a los valores de temperatura promedio/mes y humedad relativa/mes para el municipio de Floridablanca, Santander, en la cual se puede observar cómo los niveles de temperatura y humedad relativa van cambiando a lo largo del año y, a su vez, cómo estos presentarán valores específicos para cada municipio que pueda ser evaluado en una futura investigación relacionada con el tema objeto de estudio, generando con ello evidencia de la gran variedad de condiciones climáticas que pueden estar presentes durante los procesos de cultivo, fermentación, secado y almacenamiento, los cuales juegan un papel muy importante en la calidad del cacao y en sus propiedades físicas y organolépticas durante su procesamiento.

En las figuras 9 y 10 se describe el comportamiento de la serie de tiempo de la variable objeto de estudio (temperatura y humedad relativa), los valores que ha generado el modelo de Holt-Winters y el pronóstico de cada una de ellas para los meses futuros en el presente año.

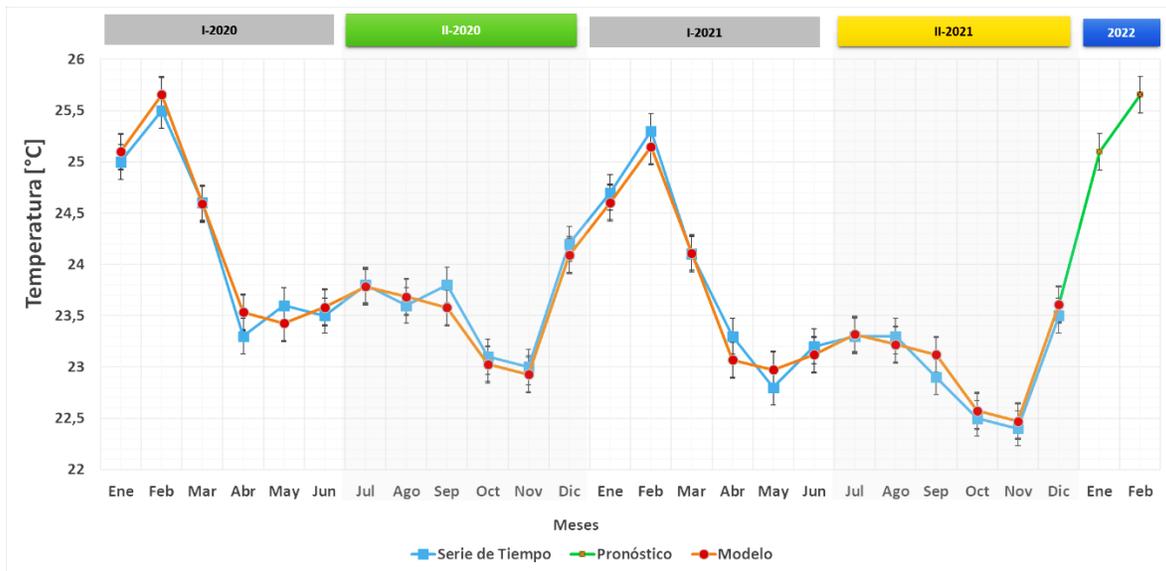


Figura 9. Valores reales y de predicción acompañados del error de estimación sobre la temperatura promedio mensual [°C] 2020-2021

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Coeficientes de ajuste del modelo correspondientes a la figura 9.

	<i>L</i>	12
Coeficientes del modelo de Holt-Winters	α	0,010
	γ	0,010
	δ	0,010
Coeficiente de correlación del modelo (<i>R</i>)		0,986291827
Coeficiente de correlación ajustado (<i>R_{aj}</i>)		0,972771568
Error estándar de estimación		0,014234898

Fuente: Elaboración propia

Acorde con los resultados obtenidos mediante el uso del modelo de Holt-Winters propuesto para cada variable, se puede evidenciar un alto nivel de satisfacción y ajuste frente a los valores de cada serie de tiempo, con un nivel de confianza del 95 %, teniendo en cuenta que los coeficientes de correlación (*R*) y el coeficiente de correlación ajustado (*R_{aj}*) presentan valores superiores a 0,9, acompañado de valores muy bajos correspondientes al error estándar de estimación. Adicionalmente, se observa que en los tres casos el coeficiente de correlación (*R*) es muy cercano a la unidad, donde un valor de 1,0 corresponderá a una correlación perfecta.



Figura 10. Valores reales y de predicción acompañados del error de estimación sobre la humedad relativa y el promedio mensual [°C] 2020-2021
 Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Coeficientes de ajuste del modelo correspondientes a la figura 10.

Coeficiente de correlación del modelo (R)	0,999203005
Coeficiente de correlación ajustado (R_{aj})	0,998406646
Error estándar de estimación	0,009254206
	L 12
Coeficientes del modelo de Holt-Winters	α 0,010
	γ 0,010
	δ 0,010

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, en cada caso se presentan los valores óptimos calculados para los coeficientes α , γ y δ del modelo propuesto, a fin de minimizar el error estándar de estimación. Finalmente, se consideró en el modelo un valor de $L = 12$ (anual), al tener en cuenta que el comportamiento de la temperatura y la humedad relativa son periódicos anualmente y considerarlo como complemento, ya que según Fedecacao (2020) la producción nacional de cacao es permanente a lo largo del año con dos picos productivos: noviembre-diciembre-enero y abril-mayo-junio.

Estimación sobre la temperatura de punto de rocío

El punto de rocío es la temperatura a la que se debe enfriar el aire (a presión constante) para lograr una humedad relativa del 100 %. En este punto, el aire no puede contener más agua en

forma de gas, dando paso al surgimiento de gotas de agua producto de la condensación, como se comenta en Mejdal *et al.* (2017), cuanto mayor sea el punto de rocío, mayor será la cantidad de humedad en el aire.

Aunque el valor de la temperatura de punto de rocío tradicionalmente es calculado mediante el uso de tablas de temperatura vs. presión de vapor saturado, Bautista y Cruz (2018) expresan que es posible hacer uso de una expresión matemática obtenida de forma empírica, la cual debido a su simplicidad y para efectos prácticos permite calcular de una manera bastante aproximada. Siguiendo esta fórmula se registra en la tabla 5 el valor de la temperatura de punto de rocío para el municipio de Floridablanca durante los años 2020 y 2021, mediante el uso de la siguiente expresión:

$$T_{PR} = \left[\sqrt[8]{\left[\frac{HR}{100} \right]} \cdot (112 + 0.9T) \right] + 0.1T - 112 \quad (14)$$

Donde,

T_{PR} : temperatura de punto de rocío (°C)

T: temperatura (°C)

HR: humedad relativa (%)

Tabla 5. Temperatura estimada de punto de rocío y promedio mensual (°C) 2020-2021

Mes	Temperatura de punto de rocío (°C)	
	2020	2021
Ene	19,14 ± 1	18,62 ± 1
Feb	19,15 ± 1	18,96 ± 1
Mar	20,08 ± 1	19,59 ± 1
Abr	20,04 ± 1	20,04 ± 1
May	20,73 ± 1	19,94 ± 1
Jun	20,24 ± 1	19,94 ± 1
Jul	20,33 ± 1	19,64 ± 1
Ago	20,34 ± 1	19,84 ± 1
Sep	20,73 ± 1	19,65 ± 1
Oct	20,24 ± 1	19,65 ± 1
Nov	20,33 ± 1	19,55 ± 1
Dic	19,47 ± 1	18,80 ± 1

Fuente: Elaboración propia

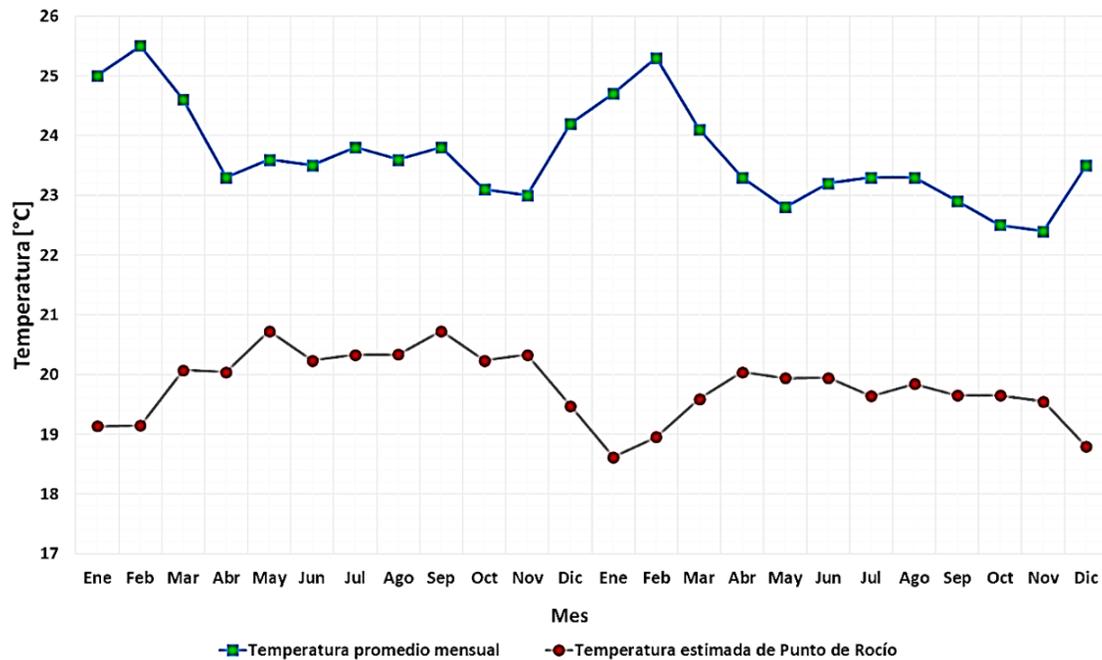


Figura 11. Temperatura promedio mensual (°C) vs. temperatura estimada de punto de rocío en el 2020-2021 y en el municipio de Floridablanca, Santander

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, en la figura 11 se presenta el comportamiento que describe la temperatura promedio mensual para el municipio de Floridablanca, acompañado de la temperatura estimada de punto de rocío durante el periodo de tiempo comprendido entre los años 2020 y 2021.

Acorde con los resultados obtenidos en las tablas 2 y 5, se puede observar que la temperatura de punto de rocío presenta un valor promedio de 3,89 °C por debajo de la temperatura promedio mensual, con una desviación estándar de 1,2 °C. En vista de lo anterior y desde un punto de vista analítico, se podría considerar como criterio que si de forma manual se inserta un termómetro en el interior de un saco de cacao y el resultado de la medición arroja un valor igual o superior a 4 °C por debajo de la temperatura que está presente en el ambiente al momento de realizar la medición, entonces podría generarse una alerta temprana de que probablemente se pueden estar presentando condiciones de punto de rocío en su interior, lo cual podría afectar de forma negativa el proceso de almacenamiento, ya que se estaría generando la posibilidad de que este incremente el nivel de humedad del grano debido a las propiedades higroscópicas del cacao y, a su vez, el surgimiento de moho desde el interior de cada saco.

Módulos de *software* que fueron desarrollados bajo el entorno web

En informática, se entiende como interfaz gráfica de usuario (gui) a aquel medio de interacción visual entre los usuarios y los dispositivos electrónicos, la cual es utilizada en la mayoría de sitios web, programas para computador, aplicaciones móviles, sistemas operativos, entre otros tipos de *software* existentes, permitiendo manipular elementos gráficos presentes en la pantalla

mediante el uso de periféricos de entrada, tales como: mouse, teclado, mecanismos táctiles, entre otros (Cantos & Molina, 2020).

El *software* desarrollado para ambiente web se encuentra instalado en un servidor web local, el cual hace uso de MySQL 5.7 como motor de base de datos para el almacenamiento de la información en el servidor local. Para la interfaz gráfica de usuario se hizo uso de HTML5, el cual corresponde a la última versión del estándar html y es utilizado convencionalmente para la creación de páginas web, a través del cual se construye todo el andamiaje o estructura del *software*. Sobre este fue necesario hacer uso de lenguajes de programación que trabajan de la mano con HTML5, tales como: php 5.6 y JavaScript, los cuales permiten la construcción de toda la lógica de programación requerida para establecer los procesos de consulta a la base de datos mediante sql, estructura de datos y de programación, procesos de entrada y salida de información, entre otros procesos. Finalmente, se utilizó Bootstrap 5, el cual es una es una biblioteca multiplataforma de código abierto para diseño de sitios y aplicaciones web, la cual contiene plantillas de diseño con tipografía, formularios, botones, cuadros, menús de navegación y otros elementos de diseño basados en html y css, así como extensiones de JavaScript adicionales.

En las figuras 12 y 13 se presentan las interfaces que fueron desarrolladas bajo el ambiente web para el registro de la información de cada uno de los bultos de cacao durante el proceso de acopio, las cuales se realizaron en su totalidad de forma manual en el sistema, teniendo en cuenta que la báscula para cuantificar el peso de cada bulto, así como los equipos que son utilizados para la medición de la humedad en el grano y la evaluación de los demás parámetros de calidad, no cuentan con una interfaz o un protocolo de comunicación común, a través de la cual sea posible realizar un proceso de integración entre equipos y en el mismo *software*.

Por otro lado, el formulario que se presenta en la figura 12 está diseñado acorde con los criterios establecidos por la norma técnica Icontec 1252 del 2003, donde se especifican los criterios de calidad según los estándares internacionales (Fedecacao, 2020), a través de los cuales se realiza el proceso de evaluación de la calidad del grano de cacao que se recibe de cada proveedor en el centro de acopio y cuyo resultado permite establecer el valor a pagar, así como las condiciones en las cuales fue adquirido para su posterior procesamiento.

A su vez, las interfaces gráficas fueron desarrolladas de tal forma que permiten realizar procesos de registro, consulta y seguimiento de forma ágil e intuitiva, facilitando con ello la reducción de problemas relacionados con el registro de la información, articulada con el uso de tecnología rfid, en donde se asigna el número de identificación del *tag* rfid con el número de identificación de cada bulto. A su vez, se incorporan diversos componentes gráficos que facilitan la organización, la visualización y la consulta de información requerida durante en el proceso de seguimiento y que están relacionados con la trazabilidad de cada bulto de cacao.

Figura 12. Módulo para registro y evaluación de la calidad del grano de cacao
Fuente: Elaboración propia

Uno de los componentes de Bootstrap que fueron incorporados en el diseño del *software* web fue “Data Tables”, el cual permite no solo visualizar la información de la base de datos de forma ordenada en forma de tablas, sino que además facilita los procesos de búsqueda y filtrado de información de manera dinámica, integrando todos los campos relacionados en las tablas a través del uso de alguna palabra relacionada con el criterio de búsqueda, la cual debe ser colocada en el cuadro de texto “Search”, tal como se puede apreciar en el módulo que se presenta en la figura 13, denominado “Registro para ingreso por bulto” y así se puede visualizar de manera instantánea la información de interés. Para incluir un nuevo bulto en el sistema, basta con presionar el botón “Agregar nuevo”, el cual solicitará simplemente el id que se desea asignar al bulto de cacao a través del lector rfid y se ingresa de manera manual su peso en kg, vinculando internamente la información complementaria de manera automática con la información de calidad del lote al cual pertenece y que fue establecida en el módulo de la figura 12. En la figura 14 se presenta el módulo que fue desarrollado para realizar la consulta de información por lote.

Módulo para registro e ingreso de bultos

Agregar Nuevo Bulto +

Show 10 entries Search:

Fecha de ingreso	ID Bulto	Peso bulto [Kg]	ID Lote	Fecha de salida	Estado actual	Editar	Eliminar
2022-03-01	123	10.5	123456	2050-12-31	BODEGA		
2022-03-29	ddceb673d6	60.2	123456	2099-12-31	BODEGA		
2022-03-29	615d1d2ba	60.2	7777	2099-12-31	BODEGA		
2022-05-12	ddceb673d9	60.5	654321	2028-05-12	BODEGA		

Showing 1 to 4 of 4 entries

Previous 1 Next

Figura 13. Módulo para registro, ingreso y seguimiento de cada bulto de cacao
Fuente: Elaboración propia

Módulo de consulta en Lotes

Excel Print Search:

Fecha	Proveedor	ID lote	Peso Lote [Kg]	Cosecha	Variedad	Clon	Certificación	No. granos bien ferm.	No. granos ligeramente ferm.	No. granos sobre ferm.
2022-05-12	FC Sede A	123456	1000	JUNIO 2022	CRIOLLO	CC551	ICONTEC	10	10	10
2022-05-12	RG Sede B	654321	1200	JULIO 2022	Forastero	CC222	ICONTEC	14	13	10

Showing 1 to 3 of 3 entries

Previous 1 Next

Figura 14. Módulo de consulta por lote
Fuente: Elaboración propia

Otra forma de realizar el proceso de consulta relacionada con información específica de un bulto de cacao es mediante el uso del prototipo de IoT-rfid, el cual consiste en deslizar el llavero rfid del saco de cacao de interés sobre el lector rfid-RC522 que se encuentra en el prototipo de *hardware*, el cual realizará la lectura del número de identificación del *tag* y enviará una solicitud de consulta al servidor, el cual retornará al dispositivo del IoT la información específica del bulto de interés. Un ejemplo de este proceso puede observarse en la figura 15.

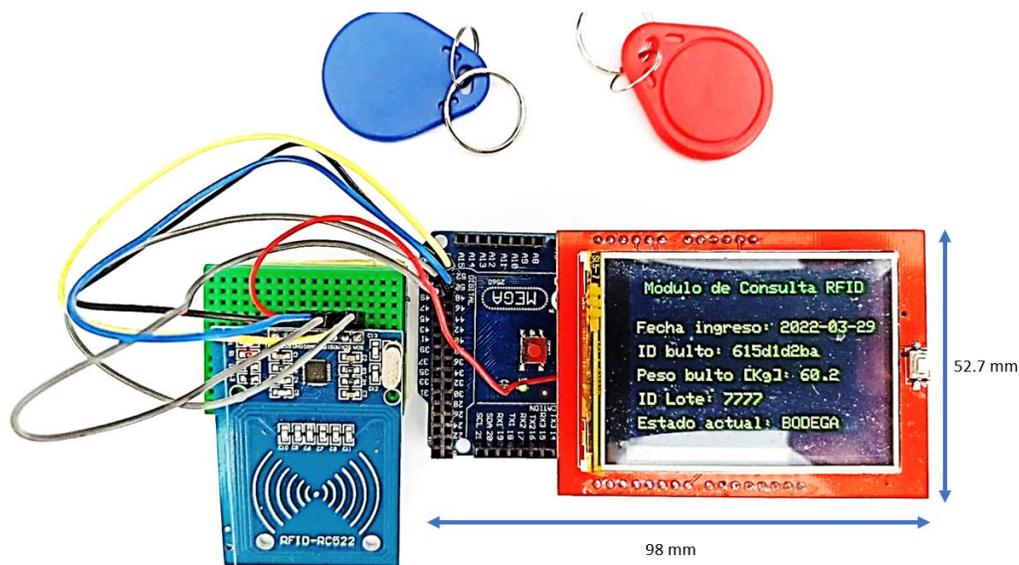


Figura 15. Evidencia de la información consultada al servidor web a través de prototipo de *hardware* rfid-IoT después de deslizar uno de los *tag* rfid en forma de llavero

Fuente: Elaboración propia

En la figura 15 se puede apreciar la información que el servidor ha enviado al prototipo del IoT como resultado del deslizamiento de un llavero rfid con el número de identificación 615d1d2ba, el cual es asociado de manera simultánea con el id del bulto de cacao, aspecto que es coherente con la información resaltada en color verde en la figura 16.

Dentro de la información base se encuentra la fecha de ingreso del bulto a la bodega, el peso del saco, el id del lote al que pertenece y el estado actual del mismo. Información más detallada puede ser consultada directamente sobre el *software* web en el cual, escribiendo el número de id del bulto o simplemente deslizando el llavero rfid sobre el lector, podrá ser visualizada.

Prueba experimental *in situ* en el interior y exterior de un saco de cacao

Con el ánimo de evaluar el funcionamiento del prototipo rfid-IoT relacionado con el módulo de instrumentación, el cual está orientado a permitir la medición de la temperatura y la humedad relativa, en el interior de un saco de cacao así como en el exterior de este, se realizó una campaña de muestreo de prueba a fin de validar no solo el funcionamiento del sistema desarrollado, sino que además permitiera adquirir algunos datos que describieran el comportamiento de estas dos variables en diferentes momentos del día. En la tabla 6 se registran los valores promedio que fueron obtenidos experimentalmente mediante el uso de los sensores PT100 y DTH11, correspondientes a la temperatura y la humedad relativa, respectivamente presentes en el ambiente y en el interior de un saco de cacao en cinco instantes de tiempo diferentes y aleatorios durante una semana. Es importante mencionar que cada valor registrado corresponde al valor promedio de 10 muestras que fueron tomadas para cada instante de tiempo, con el fin de obtener

una medida confiable y a su vez minimizar el porcentaje de error que pueda estar presente durante el proceso de muestreo.

Fecha de ingreso	ID Bulto	Peso bulto [Kg]	ID Lote	Fecha de salida	Estado actual	Editar	Eliminar
2022-03-29	ddceb673d6	60.2	123456	2099-12-31	BODEGA		
2022-03-29	615d1d2ba	60.2	7777	2099-12-31	BODEGA		
2022-05-12	ddceb673d9	60.5	654321	2028-05-12	BODEGA		

Figura 16. Evidencia de la información registrada en el servidor web y visualizada en el prototipo del *hardware* rfid-IoT
 Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Valores obtenidos experimentalmente de temperatura y humedad relativa en el ambiente y en el interior de un saco de cacao

N.º de muestra	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3		Muestra 4		Muestra 5	
Entorno	Exteri	Interi								
	or	or								
Humeda	61,00	73,00	64,00	72,00	65,00	74,00	66,00	75,00	61,00	72,00
d [%]	± 0,1	± 0,1	± 0,1	± 0,1	± 0,1	± 0,1	± 0,1	± 0,1	± 0,1	± 0,1
Tempera	26,70	22,90	29,40	24,80	28,50	24,60	30,20	26,50	29,10	25,30
tura [°C]	± 0,2	± 0,2	± 0,2	± 0,2	± 0,2	± 0,2	± 0,2	± 0,2	± 0,2	± 0,2

Fuente: Elaboración propia

Acorde con los resultados obtenidos, se pudo evidenciar de forma empírica y analítica que para el escenario propuesto, no solo se registró una disminución significativa de la temperatura en el interior del saco de cacao de prueba en comparación con las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa, sino que además los valores del gradiente de temperatura entre la temperatura ambiente y la temperatura en el interior del saco de prueba registrados se encontraban muy cercanos al valor de gradiente de temperatura establecido de 4 °C como criterio para la generación de alertas tempranas de control de calidad del grano, debido a la probabilidad

de que podría presentarse rocío en el interior de un saco de cacao. A su vez, se pudo evidenciar también que la humedad relativa al interior del saco de cacao presentó un incremento significativo cercano al 9,8 %, fenómeno que incrementa significativamente los niveles de alerta durante el tiempo en el que el grano permanezca en almacenamiento y que podría ser analizado en futuras investigaciones.

Conclusiones

Uno de los principales objetivos del IoT es mejorar los procesos actuales mediante el uso de la tecnología, la cual, si es articulada con el campo de las series de tiempo, es posible implementar soluciones que permitan analizar una variable específica a lo largo del tiempo, a fin de predecir su comportamiento en el corto, mediano y largo plazo.

Ante esta situación, se propuso un sistema bajo una arquitectura del IoT, el cual hace uso del modelo de Holt-Winters como estrategia para el análisis y la predicción sobre el comportamiento de variables como la temperatura, la humedad relativa y la temperatura de punto de rocío, las cuales juegan un papel muy importante en el control de calidad del grano de cacao durante el proceso de almacenamiento, a fin de minimizar el surgimiento de moho y hongos debido a los cambios en las condiciones del ambiente y al comportamiento del grano de cacao como un alimento higroscópico.

Acorde con los resultados obtenidos, se pudo evidenciar no solo que el prototipo es funcional y eficiente, sino que además el modelo de Holt-Winters propuesto puede ser considerado como una herramienta de predicción muy importante durante el proceso de trazabilidad del cacao, alcanzando niveles de ajuste superiores a 0,9, acompañados de un muy bajo error estándar de estimación y con un nivel de confianza del 95 %, facilitando con ello la identificación de patrones de conducta de cada variable y, a su vez, realizar predicciones con niveles de exactitud adecuados, los cuales dependerán de si la variable presenta un comportamiento determinista o un comportamiento aleatorio. Finalmente, el uso de la tecnología rfid puede ser considerada como una excelente alternativa a la hora de desarrollar sistemas basados en el IoT y el almacenamiento de información en un servidor local o remoto para la gestión de información en el ámbito agroindustrial.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia y a la Corporación Universitaria de Ciencia y Desarrollo-Uniciencia, por el apoyo recibido durante el desarrollo de este proyecto. Adicionalmente, agradecen también a los pares evaluadores y editores de la revista por sus comentarios, los cuales ayudaron a mejorar este trabajo.

Contribución de los autores

Juan Carlos Vesga realizó el diseño y análisis del modelo de series de tiempo, así como del análisis estadístico de validación del modelo en función de los resultados obtenidos. Adicionalmente fue el encargado de apoyar en el proceso de desarrollo del código fuente y redacción del artículo. Martha Fabiola Contreras se encargó de realizar las campañas de recolección de información de temperatura y demás variables ambientales relacionadas con el modelo propuesto, así como de la programación del microcontrolador y el sistema RFID, y la revisión del artículo. José Antonio Vesga, apoyó en el proceso de codificación del microcontrolador y del software web, el análisis para la estimación de la temperatura de punto de rocío y la definición de criterios de alertas tempranas encargadas de minimizar el surgimiento de moho y condiciones que afectarían la calidad del grano durante su almacenamiento, revisión y corrección del artículo.

Implicaciones éticas

Para el caso particular, el proyecto no presentó consideraciones éticas.

Conflicto de interés

Los autores manifiestan que no existen conflictos de interés en este estudio.

Financiación

El proyecto no tuvo financiación externa.

Referencias

- Afoakwa, E. (2014). *Cocoa Production and Processing Technology*. Cleveland, Estados Unidos: CRC Press. <https://www.routledge.com/Cocoa-Production-and-Processing-Technology/Afoakwa/p/book/9781138033825>
- Andrade, J., Rivera, J., Chire, G., & Ureña, M. (2019). Propiedades físicas y químicas de cultivares de cacao (*Theobroma cacao* L.) de Ecuador y Perú. *Enfoque UTE*, 10(4), 1-12. <https://doi:10.29019/ENFOQUE.V10N4.462>
- Bautista, A. L., & Cruz, F. (2018). Estimación del potencial de captura de agua atmosférica en Guásimas, Sonora. *European Scientific Journal*, 14(9), 68. <https://doi.org/10.19044/ESJ.2018.V14N9P68>
- Beg, M., Ahmad, S., Jan, K., & Bashir, K. (2017). Status, supply chain and processing of cocoa - A review. *Trends in Food Science & Technology*, 66(1), 108-116. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2017.06.007>
- Cantos, J. K., & Molina, K. J. (2020). *Análisis y desarrollo de la sección interfaz gráfica de usuario del*

- módulo framework de la plataforma del proyecto FCI - 053 temonet de la Universidad de Guayaquil.*
<http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/48814>
- ElectrotekMega. (2014). *Pantalla LCD TFT Táctil para Arduino Uno 2.4*".
<https://electrotekmega.com/producto/lcd-tft-tactil-para-arduino-uno-2-4/>
- Fedecacao. (2020). *Cadena productiva del cacao: diagnóstico de libre competencia*. Superintendencia de Industria y Comercio.
https://www.sic.gov.co/recursos_user/documentos/promocion_competencia/Estudios_Economicos/Cacao.pdf
- Figueroa, C., Mota, J., & Ferrocino, I. (2019). The challenges and perspectives of the selection of starter cultures for fermented cocoa beans. *International Journal of Food Microbiology*, 301(1), 41-50. <https://doi.org/10.1016/J.IJFOODMICRO.2019.05.002>
- Germán, A., Tauro, C., Andreo, V., Bernasconi, I., & Ferral, A. (2016). Análisis de una serie temporal de clorofila-a a partir de imágenes MODIS de un embalse eutrófico. *IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, Buenos Aires, Argentina, 697-704. <https://doi.org/10.1109/ARGENCON.2016.7585365>
- Gibbs, A., & González, E. (2017). Implementación de un sistema de control de entrada y salida empleando el módulo de lectura RFID con la tecnología Arduino. *Revista de Iniciación Científica*, 2(2), 19-34. <http://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/1245>
- Hudson, D., & Cohen, M. (2016). *Neural networks and artificial intelligence for biomedical engineering*. New Jersey, Estados Unidos: Wiley-IEEE Press.
- Lambert, M., Blaes, X., Traore, P., & Defourny, P. (2017). Estimate yield at parcel level from S2 time serie in sub-Saharan smallholder farming systems. *9th International Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images*, Brujas, Bélgica.
<https://doi.org/10.1109/Multi-Temp.2017.8035204>
- Magaly, L. M., Rolando, M. R., Fernando, M. R., & Marcela, P. S. (2020). Mensajería cliente-servidor aplicando sockets en las herramientas GEANY IDE 1.31, PHYTON 3.7 y POSTGRESQL 9.5 en el sistema operativo CENTOS 7. *Conference Proceedings (Machala)*, 4(1), 177-185. <https://doi.org/10.48190/CP.V4N1A11>
- Mejdal, M., Abouhilal, A., & Chahid, E. (2017). Effects of temperature in the performance of the thermoelectric devises: Power generation. *International Renewable and Sustainable Energy Conference-IRSEC*, Marrakech, Marruecos, 338-343, <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2016.7984011>
- Mejía, E. (2019). Predicción del consumo de energía eléctrica global de la Empresa Municipal de Servicios Eléctricos Utcubamba mediante modelos Holt-Winters. *Revista Científica Pakamuros*, 7(1), 12-23. <https://doi.org/10.37787/PAKAMUROS-UNJ.V7I1.72>
- Muñoz, M., Cortina, J., Vaillant, F., & Parra, S. (2019). An overview of the physical and biochemical transformation of cocoa seeds to beans and to chocolate: Flavor formation. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(10), 1593-1613. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1581726>
- Nair, K. (2021). *Cocoa (Theobroma cacao L.): Tree Crops*. Londres: Springer International Publishing.
- Sierra, J. E., Vesga, J. C., & Medina, B. (2018). Livestock model innovation under the concept of smart cities. *Indian Journal of Science and Technology*, 11(22), 1-6. <https://doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i22/122510>
- Vesga, J. C., Barrera, J. A., & Sierra, J. E. (2018). Design of a prototype remote medical monitoring system for measuring blood pressure and glucose measurement. *Indian Journal of Science and Technology*, 11(22), 1-8. <https://doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i22/122509>

- Wang, Q., Wang, G., Xie, X., & Zhou, L. (2019). Design and simulation for temperature measurement and control system based on PT100. *Proceedings of 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference*, Chengdu, China, 2301-2304. <https://doi.org/10.1109/IAEAC47372.2019.8997936>
- Weather Atlas. (s. f.). *Climate and monthly weather forecast Floridablanca, Colombia*. <https://www.weather-atlas.com/en/colombia/floridablanca-climate>
- Wei, W. (2013). *Time Series Analysis*. Londres: Oxford University Press.
- Wu, J., & He, Y. (2021). Prediction of GDP in Time Series Data Based on Neural Network Model. *IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Design (AIID)*, Guangzhou, China, 20-23. <https://doi.org/10.1109/AIID51893.2021.9456509>
- Yang, D., Chen, H., Song, Y., & Gong, Z. (2017). Granger Causality for Multivariate Time Series Classification. *IEEE International Conference on Big Knowledge*, Hefei, China, 103-110. <https://doi.org/10.1109/ICBK.2017.36>
- Żyżelewicz, D., Budryn, G., Oracz, J., Antolak, H., Kręgiel, D., & Kaczmarska, M. (2018). The effect on bioactive components and characteristics of chocolate by functionalization with raw cocoa beans. *Food Research International*, 113(1), 234-244. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2018.07.017>