

DISEÑO DE SISTEMA EMBEBIDO PARA LA ADQUISICIÓN DE VARIABLES CLIMATOLÓGICAS Y CUANTIFICACIÓN DE HORAS-FRÍO

Barboza-Castañeda, Ernesto; García-Vidaña, Norma Alicia; Guerrero-Rivera, Rubén; Gamero-Inda, Eduardo;
Martínez-Rivera, José Antonio
Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Durango
Maestría en Ingeniería
Blvd. Felipe Pescador # 1830 ote. C.P. 34080, Durango, Dgo., México
Tel., 6188290900
jamartinez@itdurango.edu.mx, 14040355@itdurango.edu.mx

RESUMEN.

Se presenta el diseño y la implementación de un sistema embebido para la adquisición, monitoreo de variables climatológicas y la cuantificación de horas-frío en un huerto de manzanos. El dispositivo consiste en un nodo sensor con autonomía energética que permite obtener las mediciones de temperatura y humedad relativa del aire, la información recopilada por el nodo sensor es enviada mediante protocolo LoRa hacia la puerta de enlace ubicada en un punto estratégico con cobertura de red GSM que habilita la conexión a Internet y el envío de datos a la plataforma Azure IoT Central®. La publicación de los datos provenientes del nodo sensor se realizó por medio de peticiones POST del protocolo HTTPS. La información almacenada en el servidor web se procesó para la cuantificación de horas-frío. La funcionalidad del sistema embebido se realizó en la huerta "El Moral" ubicada en el municipio de Canatlán, Durango.

Palabras Clave: agricultura de precisión, cuantificación de horas-frío, Internet de las cosas, sistemas embebidos.

ABSTRACT.

The design and implementation of an embedded system for the acquisition and monitoring of climatological variables and the quantification of chill hours in an apple orchard is presented. The device consists of a sensor node with energy autonomy that allows obtaining measurements of temperature and relative humidity of the air, the information collected by the sensor node is sent via LoRa protocol to the gateway located at a strategic point with GSM network coverage that enables Internet connection and sending data to the Azure IoT Central® platform. The publication of the data coming from the sensor node was done through HTTPS protocol POST requests. The information stored in the web server was processed for the quantification of chill-hours. The functionality of the embedded system was performed in the orchard "El Moral" located in the municipality of Canatlán, Durango.

Keywords: chill-hours quantification, embedded systems, Internet of things, smart farming.

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura ha estado presente como parte inherente en desarrollo de las civilizaciones desde la revolución neolítica, donde el ser humano pasó de la caza y la recolección a la producción de alimentos [1].

En México la agricultura es un factor clave para el desarrollo económico debido a que los alimentos producidos se consumen tanto a nivel nacional como internacional. Según [2], para el cierre del año 2023 el ingreso económico derivado de las exportaciones agroalimentarias fue de 51 mil 874 millones de dólares.

El cambio climático, la escasez de agua y los costos elevados en fertilizantes son solo algunos de los principales problemas a los que se enfrentan los agricultores en México, además, las tendencias en el crecimiento de la población implican un incremento en la demanda de producción de alimentos en el sector rural para satisfacer las necesidades de los consumidores de la mancha urbana [3].

La agricultura ortodoxa usa técnicas generales que no consideran las necesidades propias del cultivo ni las propiedades específicas según su variabilidad espacial, esto resulta en pérdida de potencial de producción o un gasto excesivo de insumos [4].

El concepto de Agricultura de Precisión (AP) se basa en una estrategia que permite aumentar la eficiencia productiva de los cultivos por medio de la medición y el manejo de los recursos según su variabilidad espacial [5], esta técnica afronta la problemática a la que se enfrentan los agricultores optimizando los procesos de producción y reduciendo el impacto ambiental. Una de las características clave de la AP es la aplicación de insumos en el momento y lugar exactos, para esto es indispensable contar con herramientas tecnológicas que brinden información al agricultor para optimizar el uso de recursos y mejorar en el desempeño ambiental y económico [6]. La selección de esta tecnología se realiza en base a la información relevante que se desea conocer para la toma de decisiones.

En el caso específico de los cultivos caducifolios la cantidad de horas-frío acumuladas es una variable de suma relevancia debido a su relación directa con el tiempo de producción y la calidad del cultivo [7], desafortunadamente y derivado de los efectos negativos del cambio climático, la acumulación de frío anual presenta una pendiente negativa.

Según [8], la acumulación de horas-frío en la región de San Pedro, Argentina, presenta una disminución asociada al cambio climático y se pronostica una tendencia negativa que podría inhabilitar el cultivo de ciertas variedades frutales en algunas regiones.

Para reducir el impacto negativo derivado de la falta de acumulación de horas-frío los agricultores hacen uso de compensadores químicos sin una perspectiva clara de la cantidad requerida para obtener los mejores resultados de producción, esto se debe principalmente a que no cuentan con las herramientas tecnológicas necesarias para determinar la acumulación de esta variable.

Los métodos utilizados para la estimación de horas-frío son el método directo mediante el uso de un termógrafo cuya aplicación resulta tediosa y el método indirecto mediante el uso de modelos matemáticos basados en técnicas de regresión lineal [9].

El uso del método indirecto suele ser muy práctico y de fácil aplicación, sin embargo, los niveles de precisión y confianza son bajos. Según [10], al comparar los modelos matemáticos propuestos por Damota, Crossa-Raynoud y Sharp con el conteo obtenido mediante el método directo que considera los valores del termógrafo del Observatorio del Colegio de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México se infirió que ningún método es adecuado para su aplicación en dicha región. En el presente trabajo se muestra la implementación de una estación meteorológica IoT de bajo costo para la cuantificación de horas-frío mediante el procesamiento de las variables de temperatura y humedad relativa del aire almacenadas en un servidor Web.

2. CONTENIDO

El diseño general del sistema IoT para la adquisición de variables climatológicas está bajo el esquema nodo sensor puerta de enlace y se realizó bajo las consideraciones de falta de acceso a una red eléctrica, acceso de red Wifi y la falta de cobertura de proveedores de red móvil en el punto donde se realizan las mediciones.

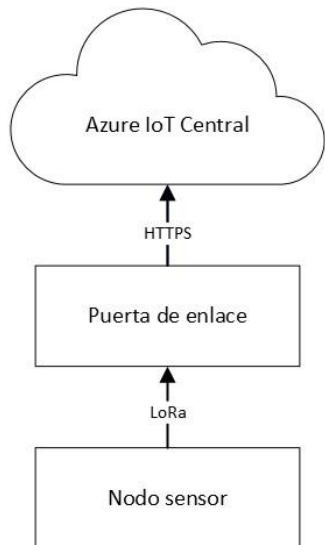


Fig. 1 Estructura general de estación de medición IoT.

Las lecturas obtenidas mediante los sensores conectados al nodo son enviadas mediante protocolo LoRa a la puerta de enlace que se encuentra ubicada en un punto con cobertura de red GSM, una vez recibidos los datos, este elemento envía la información recopilada a la plataforma Azure IoT Central® mediante peticiones POST del protocolo HTTPS, Fig. 1.

2.1. Nodo sensor LoRa.

El nodo LoRa consiste en un Arduino Nano Every encargado de recibir las lecturas del sensor DHT22 y coordinar el envío de los datos de temperatura y humedad relativa del aire en paquetes hacia la puerta de enlace por medio del módulo LoRa e5, el microcontrolador se comunica con el módulo por medio del protocolo UART.

El sensor se encuentra resguardado dentro de una pantalla de Stevenson generada mediante impresión 3D con material ASA que permite la libre circulación del aire, evita la alteración en las mediciones debido a las condiciones ambientales en las que se encuentra y protege al sensor de daños derivados de una exposición directa a los rayos UV y precipitaciones pluviales, Fig. 2.



Fig. 2 Pantalla de Stevenson, CULTS®.

Con el objetivo de facilitar su instalación en campo su conexión se realiza por medio de un cable y una caja de conexión RJ-11 que asocia los pines del microcontrolador destinados a la alimentación y la transmisión de los datos con los pines correspondientes del sensor DHT22.

La alimentación del nodo sensor se realiza mediante una batería de ácido-plomo de 12V que se recarga mediante celdas fotovoltaicas, la conexión del panel solar a la batería no se realiza directamente, es necesario el uso de un regulador de carga para suministrar la energía generada a la batería según las especificaciones técnicas del fabricante.

Las conexiones para energizar el Arduino Nano Every y los elementos periféricos conectados al mismo se realizan mediante el regulador de carga que cuenta con dos conexiones tipo USB con la capacidad de suministrar 5V, los elementos antes mencionados se muestran en la Fig. 3.

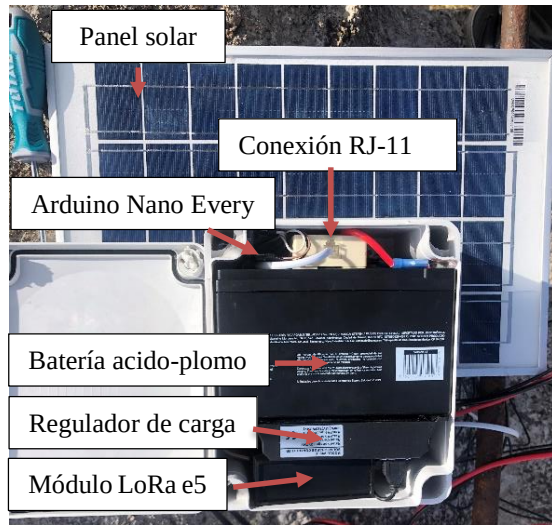


Fig. 3 Elementos del Nodo LoRa.

2.2. Puerta de enlace.

Este subsistema es el encargado de recibir los datos de temperatura y humedad relativa del aire registrados por el nodo sensor, cuenta con una llave de acceso cifrado para autorizar la publicación de información en el servidor Azure IoT Central®. El envío de datos se realiza por medio de peticiones POST bajo el protocolo HTTPS, según sea el código de respuesta del servidor se toman acciones para asegurar la correcta transferencia de los datos.

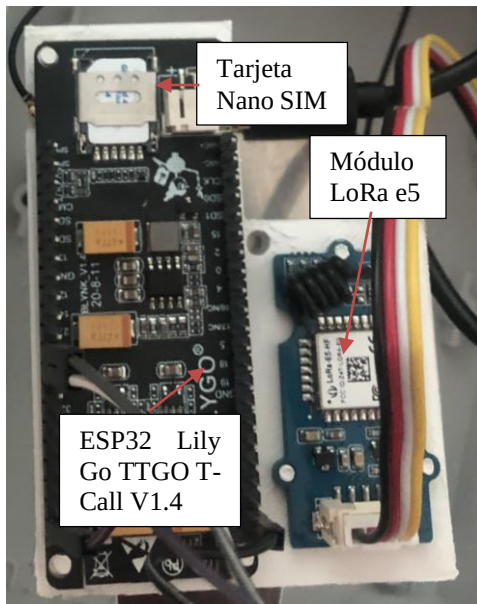


Fig. 4 Elementos de la puerta de enlace.

Los elementos que conforman esta parte del sistema son un módulo LoRa e5 y un microcontrolador ESP32 Lily Go TTGO T-Call V1.4, Fig. 4. El módulo LoRa e5 permite establecer un canal de comunicación de radio frecuencia en la banda de 915 MHz para la recepción de los datos captados por el nodo sensor. El módulo SIM800L integrado dentro de la tarjeta de desarrollo ESP32 establece la conexión a Internet para la transferencia de las variables obtenidas en periodos de 15 min. Las operaciones generales realizadas por la puerta de enlace se muestran en el diagrama de la Fig. 5.

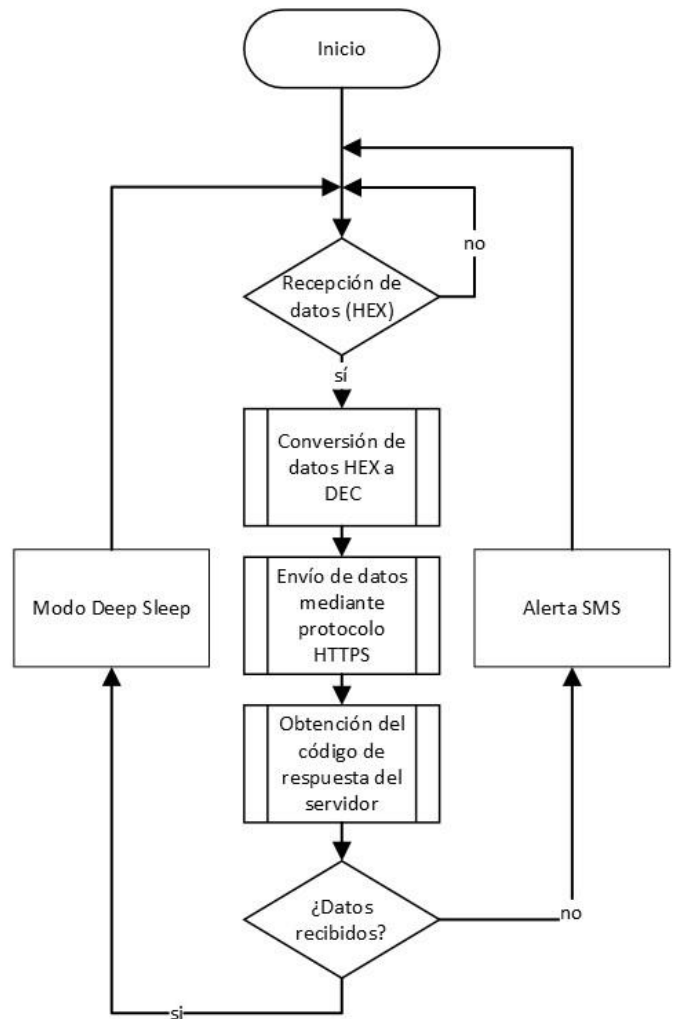


Fig. 5 Diagrama de flujo general del código en el ESP32.

El consumo energético y el costo de conexión a una red GSM son factores para considerar durante el desarrollo de soluciones IoT, el uso de la función *dormido profundo* (Deep Sleep Mode) minimiza el consumo de energía eléctrica y de datos de telefonía móvil.

2.3. Servidor Azure IoT Central.

Los servidores para el almacenamiento y el procesamiento de los datos recopilados por dispositivos IoT representan una herramienta de gran utilidad para el análisis del comportamiento de variables de proceso significativas y el monitoreo de manera remota. El uso de la plataforma Azure IoT Central® con licencia estudiantil permitió el diseño de una interfaz gráfica agradable al usuario para la interpretación del comportamiento de las variables registradas por el sistema de medición, Fig. 6.

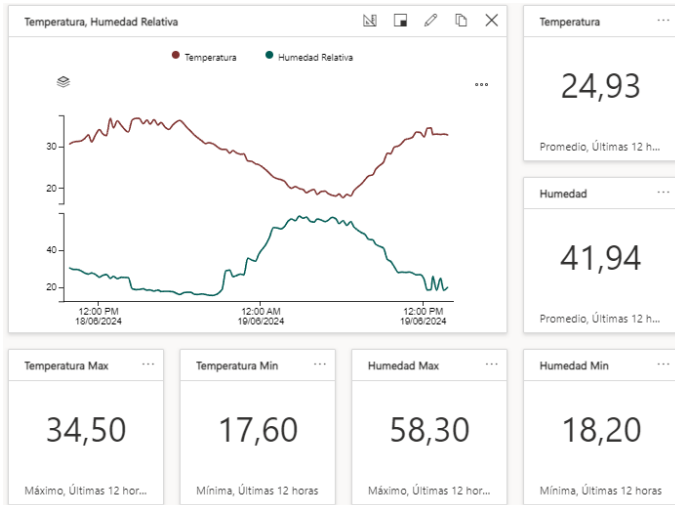


Fig. 6 Vista de interfaz de usuario en Azure IoT Central.

Los datos recopilados son accesibles por medio de dispositivos como computadoras o teléfonos móviles que cuenten con conectividad a Internet y las credenciales de autenticación para el inicio de sesión en la plataforma Azure IoT Central®.

2.4. Cuantificación de horas-frío.

Los registros almacenados en el servidor Web de temperatura y humedad relativa medidos en periodos de 15 min fueron exportados en formato CSV para su procesamiento por medio del programa Excel®, se realizó una limpieza de datos para descartar registros atípicos derivados de posibles errores de medición y se sustituyeron los datos faltantes bajo las consideraciones pertinentes.

La cuantificación diaria de horas-frío se realizó usando la ecuación (1):

$$\text{Horas Frio (diarias)} = (S - I) * f \quad (1)$$

Donde:

S = Numero de registros que se encuentran por debajo de los 7.2 °C.

I = Numero de registros que se encuentran por debajo de los 2.5 °C.

f = frecuencia de medición en horas.

El valor obtenido tras la aplicación de la ecuación (1) se redondea al valor entero más cercano. Un factor importante para la correcta aplicación de la fórmula es que los registros deben estar completos al menos durante el periodo de tiempo donde se registran las temperaturas que se encuentran dentro del rango de interés.

La imputación de la información faltante se realizó bajo la consideración de que la variación de la temperatura especialmente durante la noche no tiene una razón de cambio significativa, por lo tanto, la probabilidad de que la diferencia entre el valor estimado mediante el promedio de los datos adyacentes usando la ecuación (2) y el valor faltante sea sobresaliente es casi nula.

$$x_e = \frac{1}{2} * (x_a + x_p) \quad (2)$$

Donde:

x_e = Registro por estimar

x_a = Registro anterior al registro faltante

x_p = Registro posterior al registro faltante

Al aplicar esta metodología para registros que se encuentran dentro del rango de 2.5 a 7.2 °C se obtuvo un numero entero que representa la cantidad de horas-frío acumuladas diariamente, la estimación mensual se realizó mediante la ecuación (3).

$$\text{Horas Frio (mensuales)} = \sum_{i=1}^n HF \quad (3)$$

Donde:

HF = Registros diarios de horas-frío

n = Número de días del mes

Debido a que los cultivos satisfacen sus necesidades de frío bajo diferentes condiciones, los criterios de discriminación de los límites para el conteo pueden ampliarse o reducirse para ajustarse a las necesidades de un cultivo específico si se conoce el rango de temperatura favorable para el correcto desarrollo del cultivo en particular.

3. RESULTADOS

Se desarrolló un sistema de medición para la adquisición de datos climatológicos que opera bajo los protocolos de comunicación inalámbrica LoRa y HTTPS, el cual se adapta a las necesidades rudimentarias de su uso en el punto geográfico de donde se desea extraer la información, atendiendo a las necesidades básicas de comunicación y suministro de energía eléctrica, Fig. 7.

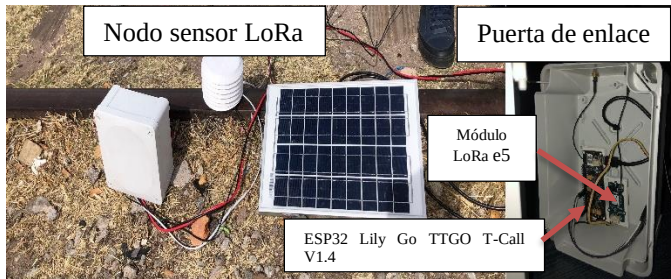


Fig. 7 Estación meteorológica IoT.

Se obtuvo una herramienta para el monitoreo y el almacenamiento de las variables de temperatura y humedad relativa del aire que cuenta con acceso remoto, Fig. 8.

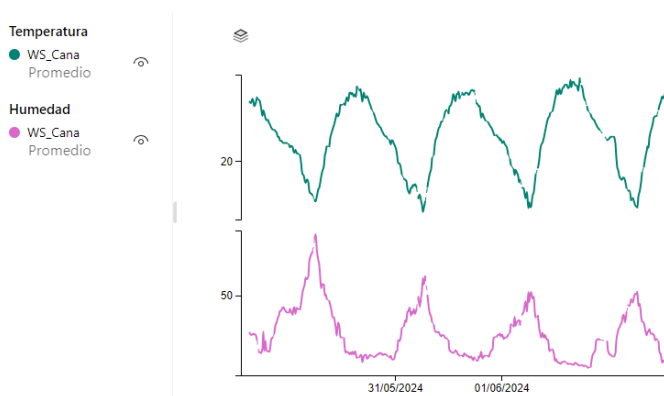


Fig. 8 Registros de temperatura y humedad relativa del aire.



Fig. 9 Alertas SMS en teléfono registrado.

Dentro del programa almacenado en la puerta de enlace se incluyó una subrutina que permite prevenir la pérdida de datos mediante alertas SMS a un teléfono registrado, Fig. 9.

La metodología aplicada durante el desarrollo de este proyecto permitió la cuantificación de la cantidad horas-frío acumuladas durante el mes de marzo del año 2024 con un total de 85 horas-frío. En la tabla 1, se presenta la comparación del desempeño del método propuesto con algunos modelos matemáticos usados en la literatura.

Tabla 1. Estimación de horas-frío durante el mes de marzo.

Método	Horas-frío	Error (Absoluto)	Error (%)
Estación IoT	85	0	0
Da Mota	24.6199618	60.3800382	71.035339
Sharp (Torres, R)	98.8364476	13.8364476	16.2781736
Sharp (Morales, M)	98.8864476	13.8864476	16.3369972
Crossa-Raynoud	199.757178	114.757178	135.008445

Los resultados obtenidos demuestran la variabilidad de los métodos de estimación, el error del 16 % de los métodos derivados de Sharp no parece significativo, sin embargo, es necesario tomar en consideración que este solo representa la acumulación de un mes y que el error acumulado durante el periodo donde se realiza la cuantificación de horas-frío podría ser mayor, esto implica una incertidumbre para asegurar la correcta toma de decisiones.

4. CONCLUSIONES

La herramienta tecnológica presentada en este trabajo permitió el monitoreo de las variables climatológicas y la cuantificación de horas-frío en una huerta de manzanos, minimizando la brecha entre precisión y practicidad que ofrecen los métodos tradicionales.

Esta metodología se presenta como una alternativa para la estimación de horas-frío con el objetivo de proveer al agricultor información relevante para la toma de decisiones respecto al uso de compensadores químicos y la viabilidad de producción de cultivos en función de sus necesidades.

El sistema de alerta por mensajes SMS permitió minimizar la pérdida de datos derivados de fallos previstos o imprevistos durante el periodo en que se realizó el estudio.

El uso de dispositivos caracterizados por su bajo consumo como el Arduino nano every aunado a las funciones para el ahorro de energía del ESP32 permitieron afrontar las limitantes de la falta de acceso a la red eléctrica en el punto geográfico donde se realizó el estudio.

5. TRABAJO A FUTURO

Para mejorar el desempeño del sistema de medición se propone la implementación de funciones que permitan una mayor autonomía para renovar las credenciales y el dominio asociado al servidor, además, la integración de sensores que permitan obtener información de interés para la toma de decisiones como anemómetros, sensores de humedad de suelo y luminosidad.

REFERENCIAS

- [1] A. L. R. R. A. L. V. A. Rosalía Virginia Ocampo Velázquez, «Editorial Universidad de Almería,» [En línea]. Available: <https://editorial.ual.es/media/unalmeria/files/sample-147222.pdf>.
- [2] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, «Gobierno de México,» SADER, 11 Febrero 2024. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/rompen-record-exportaciones-agroalimentarias-en-2023-superan-los-51-mil-mdd-agricultura#:~:text=En%20los%20resultados%20preliminares%20presentados,correspondi%C3%B3%20a%20las%20exportaciones%20nacionales..> [Último acceso: 04 Junio 2024].
- [3] INCyTU, «foro consultivo científico y tecnológico,» Abril 2018. [En línea]. Available: https://foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCYTU_18-015.pdf. [Último acceso: 05 Junio 2024].
- [4] F. R. Leiva, «LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN: UNA PRODUCCIÓN MÁS SOSTENIBLE Y COMPETITIVA CON VISIÓN FUTURISTA,» de *VIII Congreso de la Sociedad Colombiana de Fitomejoramiento y Producción de Cultivos*, Bogotá, D. C., 2003.
- [5] R. O. B. y L. F. M., «International Plant Nutrition Institute (IPNI),» [En línea]. Available: <http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/42C40288498C96B78525799C0058ED51/%24FILE/AgricPrecisionOrtega.pdf>. [Último acceso: 04 Junio 2024].
- [6] E. G. y F. Flego, «Universidad de Palermo,» [En línea]. Available: <https://www.palermo.edu/ingenieria/downloads/pdfwebc&T8/8CyT12.pdf>. [Último acceso: 04 Junio 2024].
- [7] F. P. Cecilia, «Requerimiento de frío en frutales efectos negativos sobre la producción de fruta (Primera parte),» 2007. [En línea]. Available: <https://rehip.unr.edu.ar/server/api/core/bitstreams/2e05b970-3490-4b53-b26b-00df2da3d970/content>. [Último acceso: 05 Junio 2014].
- [8] S. Maio, «Estimación de valores agroclimáticos de horas de frío en San Pedro (Provincia de Buenos Aires, Argentina) y escenario futuro,» *Revista Argentina de Agrometeorología*, vol. 11, pp. 45-53, 2020.
- [9] E. M. García, «CUANTIFICACIÓN Y ACUMULACIÓN DE HORAS-FRÍO Y DÍAS-GRADO EN EL VALLE ALTO DE COCHABAMBA,» *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, vol. 7, n° 2, pp. 144-150, 2020.
- [10] J. C. G. R. y L. M. M. M., «Huerto Fenológico del colegio de geografía,» [En línea]. Available: <http://huertofenologico.filos.unam.mx/files/2017/05/CONCEPTO-DE-HORAS-FRÍO.pdf>. [Último acceso: 05 Junio 2024].