



## Sistema IoT para el monitoreo de variables climatológicas en cultivos de agricultura urbana

### IoT System for Monitoring of Climatological Variables in Urban Agriculture Crops

### Sistema IoT para monitoramento de variáveis climatológicas em culturas de agricultura urbana

Gabriel-Elías Chanchí-Golondrino <sup>1</sup>

Manuel-Alejandro Ospina-Alarcón <sup>2</sup>

Manuel Saba <sup>3</sup>

**Recibido:** octubre de 2021

**Aceptado:** marzo de 2022

**Para citar este artículo:** Chanchí-Golondrino, G. E., Ospina-Alarcón, M. A., y Saba, M., (2022). Sistema IoT para el monitoreo de variables climatológicas en cultivos de agricultura urbana. *Revista Científica*, 44(2), 257-271. <https://doi.org/10.14483/23448350.18470>

#### Resumen

A partir de la creciente tendencia de la agricultura urbana, este trabajo tiene por objetivo la construcción de un sistema IoT para la monitorización y el análisis de variables climatológicas de interés en cultivos de agricultura urbana. La metodología considerada para el desarrollo de la presente investigación está constituida por cuatro fases: selección de herramientas y tecnologías, diseño de arquitectura del sistema IoT, construcción de prototipo del sistema y estudio de caso en el contexto del cultivo de lechuga. Como resultado de la presente investigación, se construyó un sistema IoT basado en herramientas de hardware y software libre, el cual está articulado dentro de la arquitectura convencional de cuatro capas de IoT (captura, almacenamiento, análisis y visualización). Con respecto a las soluciones

existentes, la ventaja del sistema es el uso de plataformas portables SBC, así como la inclusión de modelos de aprendizaje automático dentro de la capa de análisis. A partir del estudio de caso, desarrollado sobre un cultivo de lechuga casero, se concluye que las herramientas escogidas permiten realizar de manera adecuada la captura, la monitorización y el análisis de variables climatológicas de interés en cultivos de agricultura urbana. Del mismo modo, se concluye que los modelos de análisis considerados pueden ser personalizados teniendo en cuenta las características agroclimáticas de cada cultivo y que resultan útiles para la toma de decisiones relacionadas con la fisiología de los cultivos.

**Palabras clave:** agricultura urbana; aprendizaje no supervisado; cultivos; internet de las cosas; monitoreo.

1. Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias, Bolívar, Colombia. Contacto: [gchanchig@unicartagena.edu.co](mailto:gchanchig@unicartagena.edu.co)

2. Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias, Bolívar, Colombia. Contacto: [mospinaa@unicartagena.edu.co](mailto:mospinaa@unicartagena.edu.co)

3. Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias, Bolívar, Colombia. Contacto: [msaba@unicartagena.edu.co](mailto:msaba@unicartagena.edu.co)

## Abstract

Based on the growing trend of urban agriculture, this work aims to build an IoT system for the monitoring and analysis of climatological variables of interest in urban agriculture crops. The methodology considered for conducting this research comprises four phases: selection of tools and technologies, design of the IoT system architecture, construction of the system's prototype, and a case study in the context of lettuce crops. As a result of this research, an IoT system based on open hardware and software tools was built, which is articulated within the conventional 4-layer IoT architecture (capture, storage, analysis, and visualization). With respect to the existing solutions, the advantage of this system is the use of portable SBC platforms, as well as the inclusion of machine learning models within the analysis layer. From the case study, conducted on a home lettuce crop, it is concluded that the selected tools allow capturing, monitoring, and analyzing climatological variables of interest in urban agriculture crops. Likewise, it is concluded that the studied analysis models can be customized by considering the agroclimatic characteristics of each crop and that they are useful for decision-making related to crop physiology.

**Keywords:** crops; Internet of Things; monitoring; unsupervised learning; urban agriculture.

## Resumo

Com base na tendência crescente da agricultura urbana, este trabalho tem como objetivo a construção de um sistema IoT para o monitoramento e análise das variáveis climáticas de interesse em cultivos de agricultura urbana. A metodologia considerada para o desenvolvimento desta pesquisa consiste em 4 fases: seleção de ferramentas e tecnologias, desenho da arquitetura do sistema IoT, construção do protótipo do sistema e, finalmente, um estudo de caso no contexto do cultivo de alface. Como resultado desta pesquisa, foi construído um sistema IoT baseado em ferramentas livres de hardware e software, que é articulado dentro da arquitetura convencional de 4 camadas de IoT (captura, armazenamento, análise e visualização). O sistema tem a vantagem sobre as soluções existentes, o uso de plataformas SBC

portáteis assim como a inclusão de modelos de aprendizagem automático dentro da camada de análise. A partir do estudo de caso desenvolvido em um cultivo de alface doméstico, conclui-se que as ferramentas escolhidas permitem realizar de forma adequada a captura, o monitoramento e a análise das variáveis climáticas de interesse em cultivos de agricultura urbana. Da mesma forma, conclui-se que os modelos de análise considerados podem ser personalizados levando em conta as características de agricultura e climáticas de cada cultivo e que são úteis para a tomada de decisões relacionadas à fisiologia dos cultivos.

**Palavras-chaves:** agricultura urbana; aprendizagem não supervisionado; cultivo; internet das coisas; monitoramento.

## Introducción

Una de las temáticas que ha tenido gran difusión en la última década gracias a las ventajas de monitorización y automatización de diferentes procesos en diversos contextos de aplicación es internet de las cosas (IoT) ([Babun et al., 2021](#); [Gulati et al., 2021](#); [Viel et al., 2019](#)). De acuerdo con la ITU-T, IoT puede ser entendido como una infraestructura global para la sociedad de la información que permite el despliegue de servicios avanzados a través de la interconexión de objetos físicos y virtuales mediante el uso de tecnologías de la información y comunicación interoperables ([Pannu y Kay, 2020](#); [Raglin, Venkateswaran y Liu, 2019](#); [Youm, 2017](#)). Del mismo modo, IoT puede ser definido como la conexión de objetos físicos o dispositivos en una red abierta, la cual tiene la capacidad de autogestionarse, compartir información, datos y recursos, reaccionar y actuar frente a situaciones y cambios en el entorno ([Conti et al., 2018](#); [Soumyalatha y Shruti, 2016](#)). De este modo, a través de la identificación y la captura de datos, así como las capacidades de comunicación y procesamiento, IoT hace uso integral de las cosas para ofrecer servicios para todo tipo de aplicaciones (Secretaría de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, s.f.).

Diferentes son los contextos en los que ha sido aplicado IoT, dentro de los cuales se destacan: agricultura de precisión y ganadería, medio ambiente, telemedicina, gestión de almacenes, gestión de logística ([Mateos Matilla et al., 2021](#)). Dentro de dichos contextos, a partir del uso de diversos sensores se realiza la monitorización de variables de interés, las cuales son almacenadas, procesadas y visualizadas de cara a la toma de decisiones que permitan mejorar los procesos asociados a dichos contextos ([Chanchí, Ospina y Campo, 2021](#); [Sánchez Hernández et al., 2021](#); [Martini et al., 2021](#); [Quiroga Montoya et al., 2017](#); [Sarrab, Pulparambil y Awadalla, 2020](#); [Singh y Ahmed, 2021](#); [Suseendran y Balaganesh, 2021](#)). En el caso particular de la agricultura, una de las tendencias actuales derivada del crecimiento de las ciudades es el surgimiento de nuevos modelos como la agricultura urbana o agricultura en casa, mediante la cual se pretende contribuir a incrementar la calidad de vida y la salud alimentaria de las personas ([Hernández, 2006](#)). A partir de lo anterior se hace necesario definir arquitecturas y sistemas IoT adaptados a las particularidades del contexto de la agricultura urbana, de tal modo que se propicie la monitorización, el análisis y la visualización de variables de interés que influyan en el desarrollo de los cultivos ([Mendoza, 2016](#)).

Diferentes trabajos se han desarrollado en el campo de la agricultura de precisión, por ejemplo, [Podder et al. \(2021\)](#) proponen un sistema Smart AgroTech basado en IoT que considera la temperatura y la humedad del suelo como parámetros agrícolas necesarios. El sistema propuesto decide si la acción de riego debe comenzar o detenerse dependiendo de las condiciones de la tierra agrícola y proporciona la instalación de monitoreo y control remoto al propietario de la finca. Los datos de los parámetros agrícolas se envían a la web a través de un módulo ESP8266, que se supervisa y controla mediante el servidor Thing-Speak de forma remota desde cualquier parte del mundo. Por otro lado, en [Miles et al. \(2020\)](#) presentan un estudio del rendimiento de la red de comunicación

LoRaWAN en el contexto de una aplicación de IoT para una granja piloto, específicamente para agricultura urbana en áreas rurales remotas o áreas urbanas aisladas. Se consideraron varios escenarios utilizando Network Simulator 3. Los autores proponen un modelo matemático que predice con precisión la tasa de entrega exitosa de paquetes para este tipo de red, considerando el número de nodos y la duración del intervalo de transmisión. Se trata de una configuración adecuada para muchas aplicaciones agrícolas como monitoreo de suelo y aire, riego y agricultura de ambiente controlado, entre otros. [Kalathas et al. \(2016\)](#) proponen un sistema basado en hardware libre para la monitorización de las variables temperatura y humedad tanto del aire como del suelo en semillas de tomate, el cual incluye control automático para mantener condiciones ideales de este cultivo. [Jai-shetty y Patil \(2016\)](#) proponen como aporte una red de sensores IoT para la monitorización de variables de interés (temperatura, humedad, luminosidad, entre otras) en cultivos usando tecnologías en la nube como ThinkSpeak y el protocolo MQTT. [Vyas, Borole y Singh \(2016\)](#) proponen un sistema IoT basado en herramientas de hardware libre y redes de sensores para la monitorización de variables de interés en cultivos, el cual consta de tres capas: captura, transmisión y aplicación. [Mohanraj, Ashokumar y Naren \(2016\)](#) proponen un sistema IoT para la monitorización de variables como temperatura y humedad en cultivos, así como la automatización de la irrigación a partir de la definición de una base de conocimiento. Los anteriores trabajos presentan soluciones enfocadas en la agricultura de precisión, en los cuales se tiene como ventaja el uso de herramientas de hardware libre para la monitorización y la visualización de los datos, quedando como desafío la adaptación de dichos sistemas al contexto de la agricultura urbana, así como la vinculación de métodos de aprendizaje supervisado y no supervisado dentro de la arquitectura de estos sistemas, de cara a facilitar la toma de decisiones con respecto a la fisiología de los cultivos.



**Figura 1.** Metodología considerada

En este artículo se propone como aporte el desarrollo de un sistema IoT para la monitorización de variables de interés climatológicas dentro de cultivos de agricultura urbana o en entornos de huerta en casa, el cual está enmarcado dentro la arquitectura a cuatro capas de IoT (captura, almacenamiento, análisis y visualización). En la capa de captura mediante el uso de diferentes sensores se obtienen variables de interés, tales como temperatura, humedad y luminosidad, las cuales son enviadas a una tarjeta de captura que tiene implementado un mini servidor web que permite poner a disposición la información de dichas variables vía peticiones HTTP. En la capa de almacenamiento se solicitan de manera periódica las variables de interés a la tarjeta de captura, de tal modo que una vez obtenidas dichas variables son almacenadas mediante sesiones en una base de datos no relacional. Dentro de la capa de análisis los datos de las sesiones son cargados con el fin de aplicar diferentes medidas estadísticas, así como modelos de aprendizaje supervisado y no supervisado. Finalmente, en la capa de visualización es posible realizar un seguimiento en tiempo real sobre las variables de interés, así como visualizar los resultados de los análisis estadísticos y los modelos de aprendizaje supervisado.

El sistema propuesto en este artículo pretende servir de referencia para la implementación de sistemas IoT de seguimiento y monitorización en escenarios de agricultura urbana, de tal modo que puedan ser particularizados para las características agroclimáticas de diferentes tipos de cultivos. El artículo está organizado de la siguiente forma: en primera instancia se presenta la metodología considerada para el desarrollo de la presente investigación, posteriormente se describen los resultados obtenidos incluyendo la descripción de la

arquitectura del sistema y un estudio de caso con la aplicación del sistema en la monitorización de variables de interés de un cultivo de lechuga en casa, finalmente se describen las conclusiones y los trabajos futuros derivados de la presente investigación.

## Metodología

Para el desarrollo del presente trabajo se han definido cuatro fases metodológicas, a saber: selección de herramientas y tecnologías, diseño de arquitectura del sistema IoT para monitorización y análisis de variables de interés en cultivos de agricultura urbana, construcción del prototipo del sistema y finalmente estudio de caso (Figura 1).

Dentro de la fase 1 se exploró un conjunto de herramientas y tecnologías de hardware y software libre para la captura, el almacenamiento, el análisis y la visualización de variables de interés en el contexto de la agricultura urbana. Dentro de la fase 2, a partir de las herramientas y tecnologías seleccionadas en la fase 1, se especificaron tanto la vista funcional como la de implementación de la arquitectura del sistema IoT, teniendo en cuenta las cuatro capas convencionales de los sistemas IoT (captura, almacenamiento, análisis y visualización). La capa de captura permite a través del uso de sensores de IoT la obtención de variables relevantes asociadas a los cultivos en el contexto urbano (temperatura, humedad, luminancia), las cuales son enviadas a una placa de captura de hardware libre en la que dichas variables son empaquetadas en mensajes JSON y dispuestas vía WiFi a la capa de almacenamiento mediante peticiones HTTP. En la capa de captura las variables obtenidas son almacenadas en una base de datos no relacional junto con una estampa de tiempo. Dentro

de la capa de análisis se aplican modelos de *machine learning* y, de manera específica, de aprendizaje no supervisado sobre los datos obtenidos en la capa de captura, con el fin de determinar la distribución de los datos respecto a niveles de referencia correspondientes a las variables de interés consideradas. Finalmente, en la capa de visualización es posible realizar un seguimiento en tiempo real a las variables capturadas, así como consultar los resultados del análisis estadístico y de *machine learning* sobre los datos de cada sesión de captura. A partir de lo anterior es presentado en la [Figura 2](#) un diagrama de secuencia en UML que ilustra la interacción de las diferentes capas del sistema IoT.

En la fase 3, a partir de la arquitectura diseñada, se construyó un prototipo del sistema IoT, teniendo en cuenta las vistas, capas y tecnologías definidas en la fase 1. Finalmente, en la fase 4 se verificó la funcionalidad del sistema implementado a través de un estudio de caso desarrollado sobre un cultivo de lechuga casera, teniendo en cuenta las características agroclimáticas asociadas a dicho cultivo

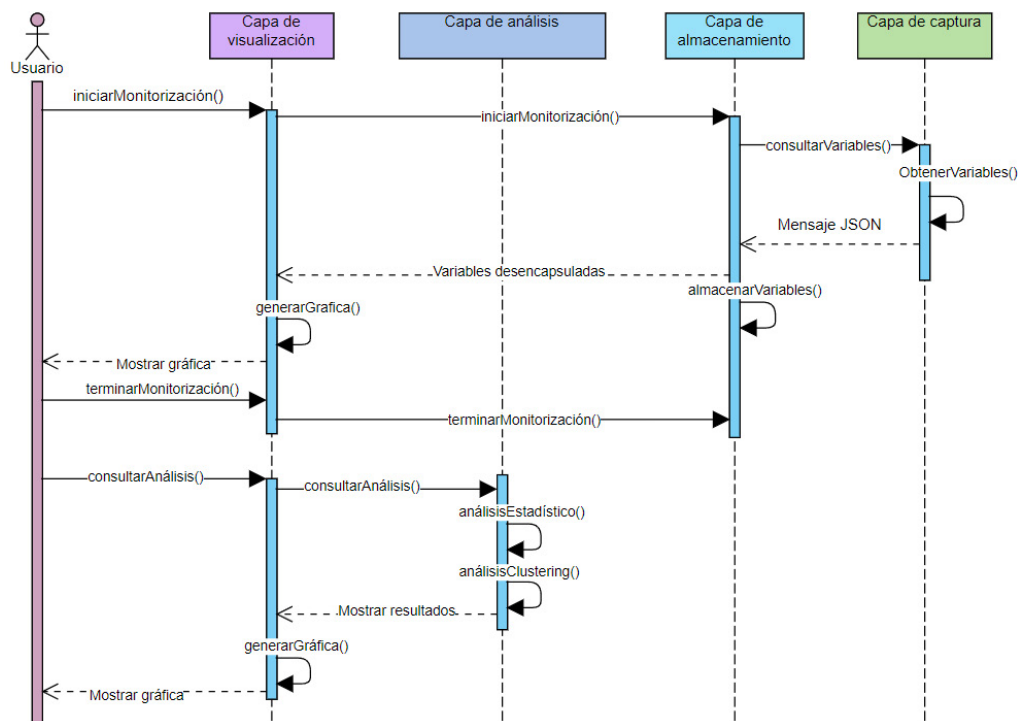
y realizando un análisis sobre los datos capturados a nivel estadístico y mediante el uso de modelos de aprendizaje no supervisado o *clustering*. A través del uso de estos modelos es posible identificar las tendencias de las variables climatológicas, así como obtener la distribución gráfica de los datos capturados con respecto a los valores de referencia de las variables climáticas consideradas.

## Resultados

En esta sección se presentan los resultados de la presente investigación, lo cual incluye las vistas de la arquitectura del sistema IoT, así como las interfaces definitivas del sistema y un estudio de caso que permite verificar la funcionalidad del sistema implementado.

## Arquitectura del sistema IoT

Para la construcción del sistema IoT presentado en este artículo se diseñó una arquitectura a



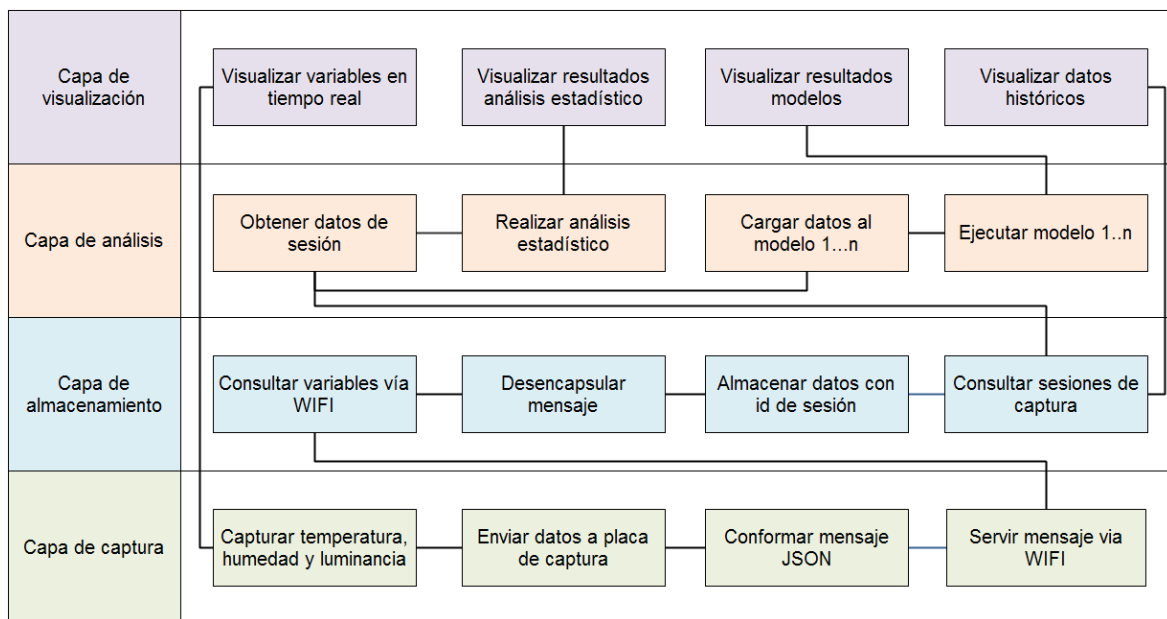
**Figura 2.** Interacción de las capas del sistema IoT

cuatro capas (captura, almacenamiento, análisis y visualización), la cual es representada mediante una vista funcional y una vista de implementación. Dentro de la vista funcional se describen los diferentes procesos correspondientes a las cuatro capas de la arquitectura, mientras que en la vista de implementación se muestran las herramientas o tecnologías escogidas para dar cumplimiento a los procesos de la vista funcional.

A partir de lo anterior, en la [Figura 3](#) se muestran los diferentes procesos de la vista funcional asociados a las cuatro capas de la arquitectura del sistema IoT para la monitorización y el análisis de variables de interés en cultivos de agricultura urbana.

En la capa de captura, a través del uso de diversos sensores articulados al cultivo urbano, se obtienen los datos asociados a las variables climáticas de temperatura, humedad y luminancia, los cuales son enviados a una placa de captura de hardware libre, dentro de la que se conforma un mensaje JSON con los datos de las variables y se sirven dichos mensajes a través de Wi-Fi mediante peticiones HTTP. En este sentido, la placa cuenta con las posibilidades de implementación de un

mini servidor web, que recibe y atiende peticiones desde las diferentes capas de la arquitectura. Desde la capa de almacenamiento, se realiza de manera periódica la consulta de las variables de interés a la placa de captura vía Wi-Fi y a través de peticiones HTTP, de tal manera que una vez obtenido el mensaje JSON con los datos de las variables de interés, dicho mensaje es desencapsulado y almacenado en una base de datos no relacional, usando un identificador para la sesión de captura, el cual es útil para realizar procesos de consulta del histórico de las sesiones. En este sentido, dentro de esta capa están comprendidos los procesos relacionados con la consulta de los datos de cada sesión de captura, los cuales son utilizados en la capa de análisis y visualización. En la capa de análisis en primera instancia se carga el conjunto de datos correspondientes a una sesión en particular, de tal modo que sobre las variables de una sesión de captura es posible realizar un análisis basado en medidas estadísticas (media, desviación estándar, mínimo, máximo), así como aplicar modelos de aprendizaje supervisado y no supervisado, haciendo énfasis —en este caso— en los modelos de agrupamiento, los cuales permiten analizar la



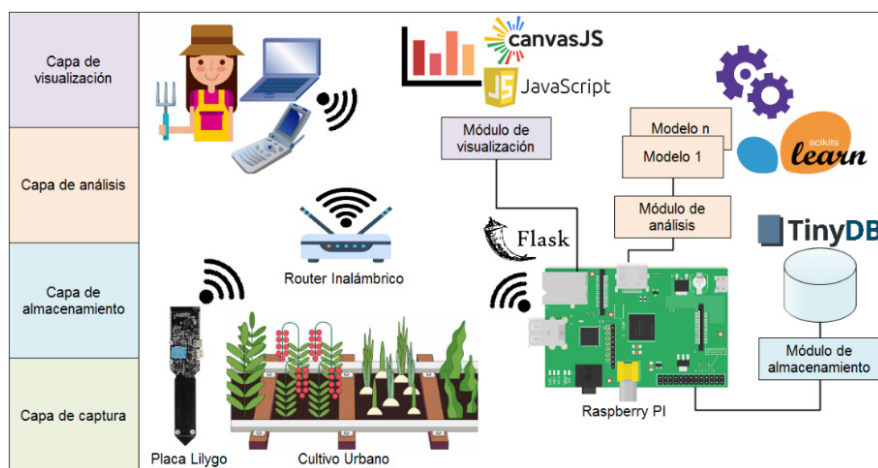
**Figura 3.** Vista funcional de la arquitectura

distribución de las variables entre sí o con respecto a valores típicos de referencia correspondientes a cada cultivo. Finalmente, en la capa de visualización es posible presentar de manera gráfica al usuario final la fluctuación de las variables capturadas (temperatura, humedad, luminancia) en el tiempo, así como los resultados gráficos de la aplicación de los modelos de agrupamiento o *clustering*. Del mismo modo, en esta capa se presentan los resultados del análisis basado en estadística descriptiva, así como los resultados asociados a la consulta del histórico de los datos capturados.

En la [Figura 4](#) se presenta la vista de implementación de la arquitectura, en la cual se muestran las herramientas y tecnologías que permiten la construcción de los diferentes procesos presentados en la vista funcional de la arquitectura.

La arquitectura del sistema IoT ha sido enmarcada en el modelo cliente-servidor, de tal modo que el *backend* del sistema se encuentra implementado en una placa Raspberry PI usando el *micro-framework* Flask de Python, mientras que el *frontend* del sistema fue implementado usando lenguaje Javascript y sus librerías asociadas. De este modo, desde la placa Raspberry PI se realizan peticiones HTTP periódicas a la capa de captura, en la cual se encuentran diferentes placas de hardware libre Lilygo T-Higrow articuladas en los cultivos urbanos. Estas placas corresponden a una adaptación

de la placa libre ESP32 y tienen como ventaja la incorporación tanto de sensores de temperatura, de humedad (DHT-11) y de luminancia (TSL2561), así como de comunicación inalámbrica Wi-Fi y la posibilidad de implementar un mini servidor web para servir los datos de las variables de interés de los cultivos mediante mensajes JSON. En la capa de captura, a medida que los mensajes JSON son consultados vía Wi-Fi, se desencapsulan y almacenan con un ID de sesión mediante el módulo de almacenamiento en la base de datos no relacional TinyDB, la cual guarda los datos de las sesiones de captura en un archivo JSON. A partir de los datos de las sesiones de captura almacenadas en TinyDB, en la capa de análisis y desde la placa Raspberry PI, se cargan los datos de las sesiones y se aplican diferentes modelos de *machine learning* y, de manera específica, de aprendizaje no supervisado o *clustering*, usando la librería *scikit-learn* de Python, la cual permite la implementación de estos modelos de cara a la obtención de la distribución de los datos de variables climatológicas con respecto a niveles de referencia de los diferentes cultivos. Finalmente, en la capa de visualización es posible realizar consultas al *backend* del sistema (el cual corre en la placa Raspberry PI) desde un navegador web, corriendo desde un móvil o desde un computador portátil. De este modo, el usuario final, desde el entorno de su hogar, puede



**Figura 4.** Vista de implementación de la arquitectura

consultar en tiempo real en la capa de visualización las gráficas de las variables de interés, así como los resultados del análisis estadístico y de los modelos de analítica de datos, con el fin de tomar decisiones con respecto al cultivo específico que está monitoreando. Las gráficas son presentadas al usuario final mediante el uso de la librería CanvasJS de Javascript, mientras que los otros resultados son mostrados mediante los lenguajes HTML y Javascript. Es importante mencionar que la comunicación entre la placa Raspberry PI y la placa de captura se realiza mediante la red inalámbrica. Así mismo, la comunicación entre el cliente y la placa Raspberry se realiza mediante Wi-Fi.

## Prototipo del sistema IoT implementado

Teniendo en cuenta las vistas arquitectónicas mostradas previamente, en esta sección se presenta la descripción del prototipo del sistema IoT implementado. En la [Figura 5](#) se presenta la interfaz principal del sistema, la cual consta de cuatro pestañas: “Captura”, “Sesiones”, “Estadísticas” y “Modelos de análisis”.

En la pestaña de “Captura”, una vez el usuario presiona el botón “Iniciar”, se empiezan a hacer peticiones HTTP periódicas al mini servidor web desplegado en la placa de captura Lilygo T-Hi-grow, de tal modo que una vez desencapsulados los mensajes JSON son almacenados en la base de

datos TinyDB y presentados en el portal web del cliente mediante una gráfica en tiempo real implementada a través de la librería CanvasJS. Esta gráfica incluye las curvas de las tres variables de interés, teniendo en el eje x la marca de tiempo en el que fue capturada la variable y en el eje y el valor de la variable en la escala respectiva. Los valores recientes de temperatura, humedad y luminosidad son presentados en una tabla HTML en la parte superior izquierda de la pestaña “Captura”.

En la [Figura 6](#) se presenta la interfaz de la pestaña de “Sesiones”, en la cual es posible visualizar el listado de valores capturados dentro de una sesión particular de captura al escoger un ID determinado de sesión y presionar el botón “Consultar”.

En la [Figura 7](#) se presenta la interfaz de la pestaña “Estadísticas”, la cual permite la obtención de las medidas estadísticas de promedio, desviación, mínimo y máximo, para los variables capturadas en una sesión determinada al escoger un ID de sesión y presionar el botón “Consultar”.

En la [Figura 8](#) se presenta la interfaz de la pestaña “Modelos de análisis”, la cual permite la aplicación de dos modelos de aprendizaje no supervisado o *clustering* sobre los valores capturados en una sesión determinada al seleccionar el ID de la sección y presionar alguno de los botones “Modelo 1” o “Modelo 2”. El modelo 1 permite relacionar las variables temperatura y humedad, con el fin de determinar la distribución de estos valores

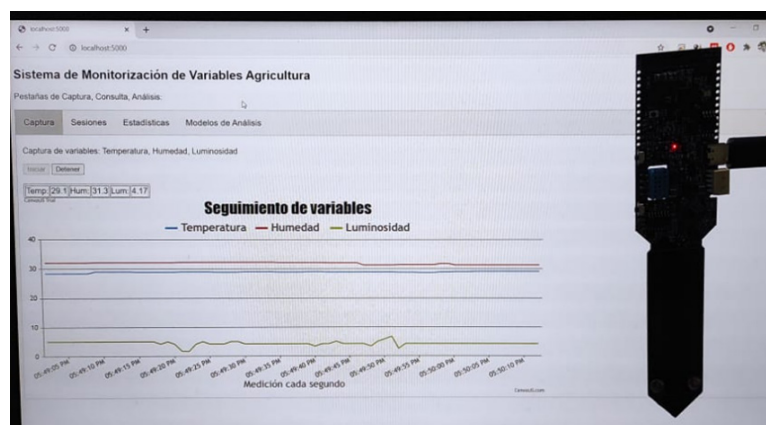


Figura 5. Interfaz principal del Sistema IoT



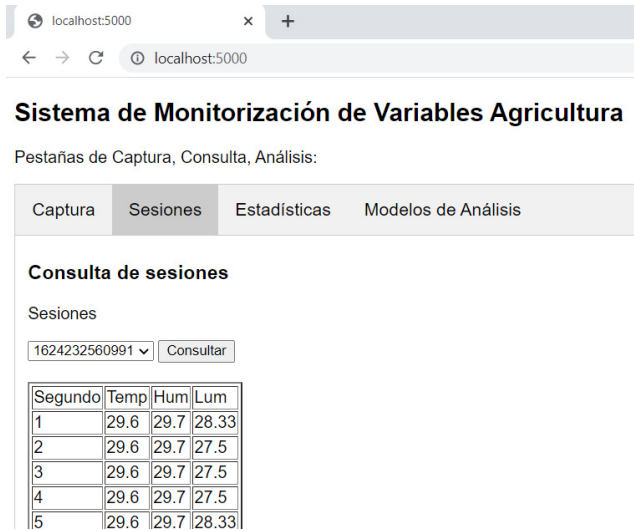


Figura 6. Pestaña Sesiones

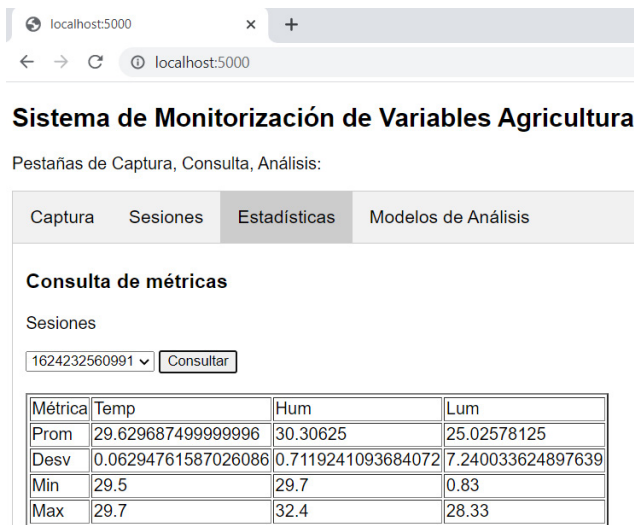


Figura 7. Pestaña Estadísticas

alrededor de dos centroides por defecto, cada uno de los cuales pertenece a un *cluster*. Por su parte, el modelo 2 busca relacionar la variable temperatura con respecto a los niveles de temperatura definidos para el cultivo de la lechuga, con el fin de determinar la distribución de estos valores alrededor de dos centroides, cada uno asociado a un *cluster*. A partir de lo anterior, la Figura 8 muestra los resultados de aplicar el modelo de *clustering* 1 sobre los datos de una de las sesiones de prueba que cuenta con un total de 64 capturas. De este modo, en color rojo se presentan los 10 valores o instancias

que han sido clasificados en el *cluster* 1, mientras que en color morado se muestran los 54 valores o instancias que han sido clasificados en el *cluster* 2. De la misma forma, en color negro se muestran los centroides pertenecientes a cada *cluster* y alrededor de los cuales se concentran los puntos en color rojo y morado. De manera específica el centroide 1 tiene como valores  $C1=\{Temp=29.7, Hum=31.68\}$ , mientras que el centroide 2 tiene como valores  $C2=\{Temp=29.617, Hum=30.052\}$ .

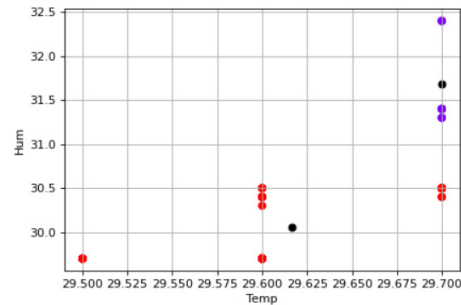
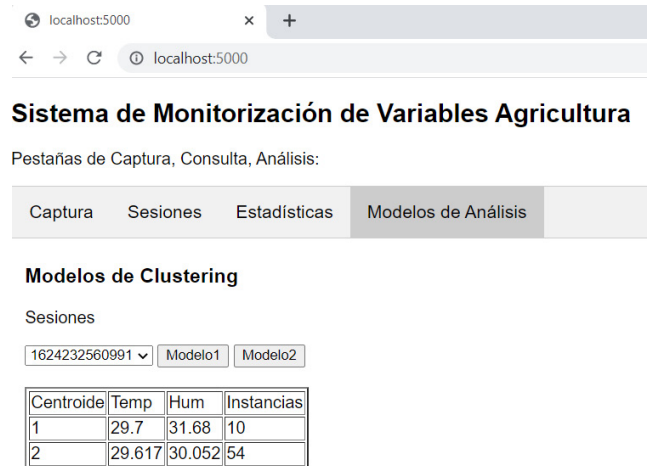


Figura 8. Pestaña "Modelo de análisis" Modelo 1

Tal como se mencionó anteriormente, para el caso del modelo de *clustering* 2, se tomaron en consideración los niveles de temperatura de referencia durante el día para el cultivo de la lechuga mostrados en la Tabla 1, realizando una adaptación a lo presentado en InfoAgro, s.f.; Ugás et al., 2000. A pesar de lo anterior, el modelo o los nuevos modelos a proponer pueden ser ajustados a diferentes cultivos, tomando como referencia los valores agroclimáticos de estos.

**Tabla 1.** Rangos de temperatura para el cultivo de lechuga

Rango	Nivel
$7 \leq \text{Temp} < 16$	0: Bajo
$16 \leq \text{Temp} \leq 20$	1: Adecuado
$20 < \text{Temp}$	2: Alto

Fuente: Adaptado de InfoAgro, s.f.; Ugás *et al.*, 2000

De acuerdo con los datos de la [Tabla 1](#) y aplicando el modelo de *clustering* 2 a los 64 valores de prueba considerados, se obtiene como resultado lo presentado en la [Figura 9](#). A partir de los resultados obtenidos, se puede apreciar que los dos *clusters* tienen como rango asociado el nivel alto, de tal modo que el *cluster* 1 tiene como valores  $C1 = \{\text{Temp} = 29.585, \text{Nivel} = 2\}$ , mientras que el *cluster* 2 tiene como valores  $C2 = \{\text{Temp} = 29.7, \text{Nivel} = 2\}$ . Lo anterior muestra que los 64 valores capturados están distribuidos alrededor del nivel 2.

**Figura 9.** Pestaña "Modelo de análisis" Modelo 2

## Estudio de caso

Tomando en consideración el prototipo del sistema descrito previamente, se realizó un estudio de caso sobre un cultivo urbano de lechuga en la ciudad de Popayán (Colombia), entre las 8 y las 9 am del día 21 de julio de 2021 ([Figura 10](#)), obteniendo un total de 250 capturas o instancias distanciadas cada 5 segundos. Las 250 instancias capturadas en el estudio de caso se consideran suficientes para la aplicación de modelos de *clustering* basados en el algoritmo K-Means, dado que para la implementación de dichos modelos no se requiere la separación de los datos en un conjunto de entrenamiento y de prueba, puesto que el objetivo de estos modelos no es obtener predicciones, sino la distribución de las variables alrededor de los niveles de referencia establecidos para los diferentes cultivos.

En la [Figura 10](#) se puede apreciar la placa de captura Lilygo T-Higrow sobre el cultivo de lechuga, así como la gráfica arrojada en tiempo real por el sistema IoT, en la cual se muestran las tres curvas asociadas a las variables de interés, en donde la curva de luminancia se encuentra en unidades de mil para mantener las proporciones en la gráfica. El estudio de caso tuvo por objetivo verificar la pertinencia de la arquitectura y del sistema IoT implementado, con el fin de que dicha arquitectura pueda ser extrapolada a diferentes cultivos urbanos teniendo en cuenta las características agroclimáticas de cada uno.

Una vez analizados a nivel estadístico y a través del sistema IoT las 250 instancias capturadas durante el estudio de caso, se obtuvieron los resultados presentados en la [Tabla 2](#). Se puede apreciar que los valores que presentan una menor variación con respecto a la media son los de la humedad, mientras que los valores que presentan una mayor variación son los de la luminancia. Con respecto a la temperatura, el valor promedio de la temperatura capturada se encuentra en el rango alto, por lo cual se deben tomar medidas en cuanto a exposición directa de la planta al sol, dado que

para temperaturas cercanas a 30° C durante un tiempo amplio puede propiciar la floración de la planta (Vázquez, 2015). En cuanto a la luminancia, el valor promedio se encuentra por encima del rango óptimo para la lechuga, el cual debe estar

entre 12000 y 30000 luxes (Vázquez, 2015). De acuerdo con lo anterior, es conveniente mejorar las condiciones de exposición de la planta al sol, reubicando el cultivo piloto, con el fin de garantizar condiciones adecuadas.

**Tabla 2.** Valores estadísticos obtenidos en el estudio de caso

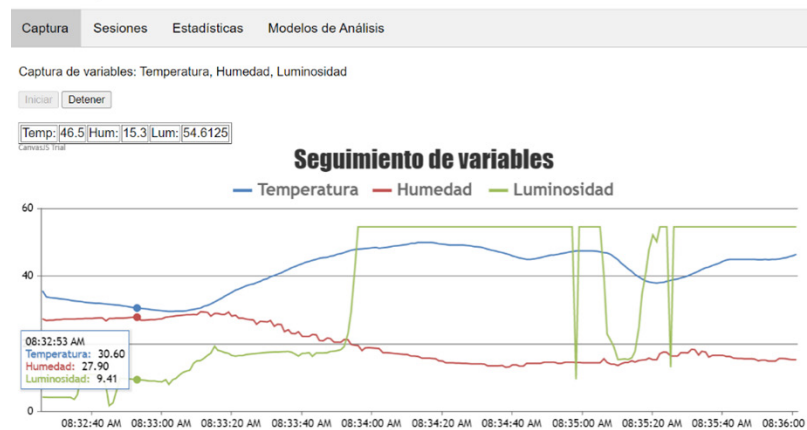
Métrica	Temperatura (° C)	Humedad (%)	Luminancia (Lum/1000)
Promedio	42.42	19.21	37.28
Desviación	6.52	5.63	20.18
Máximo	29.6	13.1	1.71
Mínimo	50	29.5	54.61

**Fuente:** Adaptado de InfoAgro, s.f.; Ugás *et al.*, 2000



**Sistema de Monitorización de Variables Agricultura**

Pestañas de Captura, Consulta, Análisis:



**Figura 10.** Estudio de caso desarrollado

Lo anterior puede observarse de manera más clara en los modelos de análisis obtenidos a partir del caso de estudio desarrollado mediante el sistema IoT propuesto (Figura 11).

En cuanto al modelo 1, ubicado en la gráfica de la izquierda, se puede observar que el 72.4 % de las instancias o lecturas fueron clasificadas en el *cluster* 1 y se encuentran alrededor del centroide  $C1=\{\text{Temp}=45.98, \text{Hum}=16.009\}$ , mientras que el 27.6 % de las capturas se encuentran clasificadas en el *cluster* 2 y se encuentran alrededor del centroide  $C2=\{\text{Temp}=33.052, \text{Hum}=27.622\}$ .

En lo referente a los resultados de la aplicación del modelo de *clustering* 2, ubicado en la gráfica de la derecha de la Figura 11, se observa que el 67.2 % de las capturas o lecturas fueron clasificadas en el *cluster* 1 y se encuentran alrededor del centroide  $C1=\{\text{Temp}=45.559, \text{Nivel}=2\}$ , mientras que el 32.8 % de las lecturas fueron clasificadas en el *cluster* 2 y se encuentran alrededor del centroide  $C2=\{\text{Temp}=33.929, \text{Nivel}=2\}$ . De lo anterior se puede concluir que el 100 % de las capturas está en el rango de temperatura alto, lo cual concuerda con los resultados obtenidos a partir del análisis del promedio de la temperatura de las capturas realizadas.

## Conclusiones

Este artículo presentó como contribución un sistema IoT para la monitorización y el análisis de variables de interés climatológicas en cultivos de agricultura urbana, teniendo en cuenta la creciente tendencia en las ciudades de este enfoque de la agricultura, cuyo objetivo es incrementar la calidad de vida y la salud alimentaria de las personas. El sistema IoT propuesto fue implementado a partir de la arquitectura convencional de cuatro capas (captura, almacenamiento, análisis y visualización), para lo cual se seleccionaron herramientas de hardware y software libres asociadas a cada una de estas capas. La arquitectura definida pretende servir de referencia para la implementación de sistemas de seguimiento de variables en el campo de la agricultura de precisión y su extrapolación en campos afines como la monitorización de variables ambientales.

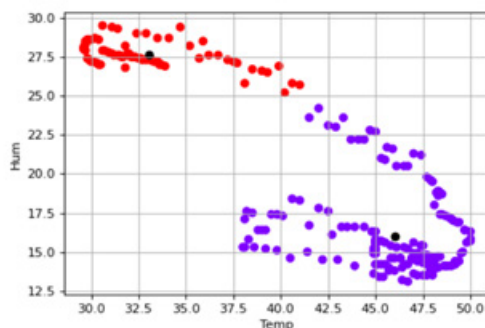
El sistema presentó diferentes herramientas y tecnologías de hardware y software libre que resultaron adecuadas para la implementación del sistema. Así, en la capa de captura, el uso de la placa Lilygo T-Higrow tiene como ventaja la posibilidad

### Modelos de Clustering

Sesiones

1624282349892 ▾ Modelo1 Modelo2

Centroide	Temp	Hum	Instancias
1	45.986	16.009	181
2	33.052	27.622	69



### Modelos de Clustering

Sesiones

1624282349892 ▾ Modelo1 Modelo2

Centroide	Temp	Nivel	Instancias
1	46.559	2.0	168
2	33.929	2.0	82

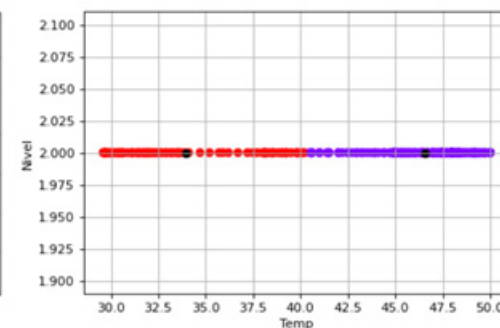


Figura 11. Modelos de *clustering* obtenidos

de implementar un mini servidor que permite responder a peticiones HTTP con los datos de las variables del cultivo, lo cual permite la escalabilidad en la construcción de servicios derivados de IoT. Del mismo modo en la capa de almacenamiento, el uso de la base de datos no relacional permite flexibilidad y facilidad para cargar los datos en los modelos de analítica de datos. Por otra parte, en la capa de análisis, la librería *scikit-learn* posibilita de manera sencilla la implementación y el uso de diferentes algoritmos de aprendizaje supervisado y no supervisado, los cuales permiten determinar las tendencias y la distribución de los datos capturados con respecto a los niveles de referencia definidos para los diferentes cultivos. Del mismo modo, en la capa de visualización, el uso de librerías derivadas de Javascript permite la compatibilidad con diferentes dispositivos de cliente. Es importante resaltar que el uso del *micro-framework* Flask para la implementación del sistema a nivel del *backend* le permite portabilidad y facilidad de despliegue en diferentes entornos, como es el caso de los dispositivos SBC como Raspberry PI.

El estudio de caso presentado en este artículo permitió verificar la utilidad del sistema IoT para la monitorización y el análisis de variables de interés climatológicas en entornos de agricultura urbana o agricultura en casa. Aunque el estudio de caso se centró en el cultivo de lechuga, los modelos de aprendizaje automático considerados pueden ser adaptados teniendo en cuenta las características agroclimáticas de los diferentes cultivos.

Como trabajo futuro derivado de la presente investigación se pretende analizar y vincular algoritmos de aprendizaje supervisado en la capa de análisis usando la librería de software libre *scikit-learn*. Adicionalmente se pretende incluir dentro de la capa de captura diferentes variables asociadas a los nutrientes del suelo. También se pretende enriquecer la arquitectura del sistema IoT propuesto mediante la centralización de los datos provenientes de diferentes sensores de agricultura de precisión en una *gateway* sustentada en el protocolo MQTT. Finalmente, se espera aprovechar

las ventajas de la placa de captura a través del uso de otros protocolos de comunicación diferentes a WiFi, como es el caso del protocolo bluetooth LE.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Cartagena por el apoyo recibido en el desarrollo de la presente investigación.

## Referencias

- Babun, L., Denney, K., Celik, Z. B., McDaniel, P., Ulugac, A. S. (2021). A survey on IoT platforms: Communication, security, and privacy perspectives. *Computer Networks*, 192, e108040. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108040>
- Chanchí, G. E., Ospina, M. A., Campo, W. Y. (2021). IoT Architecture for Monitoring Variables of Interest in Indoor Plants. *Computacion y Sistemas*, 25(4), 695–705. <https://doi.org/10.13053/CYS-25-4-4051>
- Conti, M., Dehghantaha, A., Franke, K., Watson, S. (2018). Internet of things security and forensics: Challenges and opportunities. *Future Generation Computer Systems*, 78, 544-546. <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.07.060>
- Gulati, K., Kumar Boddu, R. S., Kapila, D., Bangare, S. L., Chandnani, N., Saravanan, G. (2021). A review paper on wireless sensor network techniques in Internet of Things (IoT). *Materials Today: Proceedings*, 51, 161-165. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.067>
- Hernández, L. (2006). La agricultura urbana y caracterización de sus sistemas productivos y sociales, como vía para la seguridad alimentaria en nuestras ciudades. *Cultivos Tropicales*, 27(2), 13-25
- InfoAgro. (s.f.). *El cultivo de la lechuga*. <https://www.infoagro.com/hortalizas/lechuga.htm>
- Jaishetty, S., Patil, R. (2016). IoT sensor network based approach for agricultural field monitoring and control. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 5(6), 45-48
- Kalathas, J., Bandekas, D. V., Kosmidis, A., Kanakaris, V. (2016). Seedbed based on IoT: A case study. *Journal of Engineering Science and Technology*, 9(2), e192

- Martini, B. G., Helfer, G. A., Victória Barbosa, J. L., Espinosa Modolo, R. C., da Silva, M. R., Marques de Figueiredo, R., Sales Mendes, A., Silva, L. A., Quietinho Leithardt, V. R. (2021). IndoorPlant: A model for intelligent services in indoor agriculture based on context histories. *Sensors*, 21(5), e1631. <https://doi.org/10.3390/S21051631>
- Mateos Matilla, D., Lozano Murciego, Á., Jiménez-Bravo, D. M., Sales Mendes, A., Quietinho Leithardt, V. R. (2021). Low-cost Edge Computing devices and novel user interfaces for monitoring pivot irrigation systems based on Internet of Things and LoRaWAN technologies. *Biosystems Engineering, (Special issue)*, e10. <https://doi.org/10.1016/j.BIOSYSTEMSENG.2021.07.010>
- Mendoza, R. M. (2016). *Sistema autónomo de monitoreo y suministro de agua en plantas de ornato* [Tesis de grado]. Universidad Autónoma del Estado de México, México
- Miles, B., Bourennane, E. B., Boucherkha, S., Chikhi, S. (2020). A study of LoRaWAN protocol performance for IoT applications in smart agriculture. *Computer Communications*, 164, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.10.009>
- Mohanraj, I., Ashokumar, K., Naren, J. (2016). Field monitoring and automation using IoT in agriculture domain. *Procedia Computer Science*, 93, 931-939. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.07.275>
- Quiroga Montoya, E. A., Jaramillo Colorado, S. F., Campo Muñoz, W. Y., Chanchí, G. E. (2017). Propuesta de una arquitectura para agricultura de precisión soportada en IoT. *RISTI - Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, 24, 39-56. <https://doi.org/10.17013/risti.24.39-56>
- Pannu, M., Kay, I. (2020). Internet of things: Analyzing the impact on businesses and customers. *Advances in Neuroergonomics and Cognitive Engineering*, 322-327. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-20473-0\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-030-20473-0_31)
- Podder, A. K., Al Bukhari, A., Islam, S., Mia, S., Mohammed, M. A., Kumar, N. M., Cengiz, K., Abdulkareem, K. H. (2021). IoT based smart agrotech system for verification of urban farming parameters. *Microprocessors and Microsystems*, 82. e104025. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2021.104025>
- Raglin, A., Venkateswaran, A., Liu, H. (2019). Abductive causal reasoning for Internet of Things. En *IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computing, Scalable Computing & Communications, Cloud & Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation*, 1866-1869. <https://doi.org/10.1109/SmartWorld-UIC-ATC-SCALCOM-IOP-SCI.2019.00328>
- Sánchez Hernández, E., González García, A., Rozas Izquierdo, L., Torreblanca González, J., Silva, L. A., García Ovejero, R., Quietinho Leithardt, V. R. (2021). LoRaWAN applied to agriculture: A use case for automated irrigation systems. En J. F. de Paz Santana, D. H. de la Iglesia, & A. J. López Rivero (Eds.), *New Trends in Disruptive Technologies, Tech Ethics and Artificial Intelligence* (pp. 308-316). Springer.
- Sarrab, M., Pulparambil, S., Awadalla, M. (2020). Development of an IoT based real-time traffic monitoring system for city governance. *Global Transitions*, 2, 230-245. <https://doi.org/10.1016/j.glt.2020.09.004>
- Secretaría de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (s.f.). *Internet de las Cosas*. Ministerio de Modernización. <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/paperbenchmarkinternacional-iot.pdf>
- Soumyalatha, Shruti, G. H. (2016). Study of IoT: Understanding IoT architecture, applications, issues and challenges. En *International Journal of Advanced Networking & Applications*, 477-482
- Singh, M., Ahmed, S. (2021). IoT based smart water management systems: A systematic review. *Materials Today: Proceedings*, 46, 5211-5218. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.588>
- Suseendran, G., Balaganesh, D. (2021). Smart cattle health monitoring system using IoT sensors. En *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.873>
- Ugás, R., Siura, S., Delgado, F., Casas, A., Toledo, J. (2000). *Hortalizas. Datos básicos*. Universidad Nacional Agraria la Molina. <http://www.lamolina.edu.pe/hortalizas/Datosbasicos.html>
- Vázquez, J. G. (2015). *Evaluación agronómica de cinco variedades de lechuga (Lactuca sativa L.) en tres ciclos de siembra consecutivos, en San Miguel de la Tigua, San Carlos, Alajuela, C.R.* [Trabajo de

- grado]. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6469/evaluacion\\_agronomica\\_cinco\\_variedades\\_lechuga.pdf](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6469/evaluacion_agronomica_cinco_variedades_lechuga.pdf)
- Viel, F., Silva, L. A., Valderi Leithardt, R. Q., Zeferino, C. A. (2019). Internet of Things: Concepts, architectures and technologies. En *13th IEEE International Conference on Industry Applications*, 909-916. <https://doi.org/10.1109/INDUSCON.2018.8627298>
- Vyas, D., Borole, A., Singh, S. (2016). Smart agriculture monitoring and data acquisition system. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 3(3), 1823-1826
- Youm, H. Y. (2017). An overview of security and privacy issues for Internet of Things. *IEICE Transactions on Information and Systems*, E100(8), 1649-1662. <https://doi.org/10.1587/transinf.2016ICI0001>

