

# EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE UN INVERNADERO UBICADO EN EL DESIERTO DE ATACAMA, CHILE, A TRAVÉS DE IOT

Carlos Villarroel González, Vitelio Goykovic Cortés, Patricio Collao Caiconte, Manuel Barraza Rodríguez, Jorge Fernández Fuentes, Álvaro Villarroel Figueroa, Ricardo Valdivia Pinto y Cristóbal Castro Cruz

## RESUMEN

*Este trabajo presenta una evaluación remota del comportamiento de un invernadero, ubicado en el desierto de Atacama, norte de Chile, realizado con la finalidad de mejorar la eficiencia del uso del agua. La arquitectura de monitoreo propuesta se compone de dispositivos inalámbricos conectados entre sí por medio de WiFi y protocolos de comunicación inalámbrica de la IEEE tales como el 802.15.4. Los dispositivos empleados en la arquitectura fueron sensores de temperatura y humedad ambiental, conectados a un módulo inalámbrico WiFi, el que envió los datos a un router con conexión 3G/4G. Estos datos fueron complementados con sensores conectados a una estación meteorológica que proporciona información de la humedad y*

*temperatura del suelo. Todos los datos obtenidos fueron enviados a un servidor, a través de protocolos de Internet de las Cosas (IoT) para ser procesados. Estos datos fueron presentados en la plataforma (IoT Cloud). El propósito es contar con información en tiempo real, analizarla y realizar recomendaciones al agricultor, respecto al comportamiento del invernadero. Las evaluaciones se complementaron con un análisis del recurso hídrico, salinidad y fertilidad del suelo. El cultivo utilizado en el invernadero fue el pimentón (*Capsicum annum L.*). Con la información generada en tiempo real se facilita la toma de decisiones del agricultor respecto a la ventilación del invernadero y la puesta en marcha del riego para el cultivo de pimentón.*

## Introducción

En el último tiempo, el desarrollo en ciencia y tecnología ha permitido mejorar las condiciones de vida de los seres humanos. En el ámbito de la agricultura, este desarrollo se ha manifestado en un menor empleo de la fuerza humana, haciendo más humanizante tareas agobiantes como la preparación del suelo, control de malezas, cosecha de los cultivos, aplicación

de plaguicidas, fertilizantes y riego, entre otras tareas propias de la actividad agrícola. También está permitiendo desarrollar agricultura en ambientes protegidos que facilitan la obtención de mayores rendimientos de los cultivos.

Considerando que la producción de alimentos deberá aumentar y que la base de los recursos naturales que utiliza la agricultura, especialmente el suelo y el agua, se ha

deteriorado fuertemente, es de valor optimizar su uso, especialmente en la agricultura que se practica en ambientes desérticos, como en el caso de este estudio. (Cartes, 2013; FAO, 2015).

La influencia de las condiciones climáticas en el desarrollo de la agricultura es bien conocida. Las extremas diferencias entre el día y la noche, las características del suelo y el escaso recurso hídrico, hacen que la

agricultura en zonas desérticas sea un desafío que requiere condiciones especiales y particulares. A raíz de estas situaciones y otras que inciden en esta actividad, se han desarrollado nuevas tecnologías que permiten conocer el estado de la evolución de los cultivos y los parámetros que inciden en ella. Estas tecnologías permiten medir en tiempo real, humedad-temperatura atmosférica y del suelo, salinidad del suelo, y

## PALABRAS CLAVE / Desierto / Evaluación Invernadero / IoT / Monitoreo Remoto / MQTT /

Recibido: 05/11/2018. Modificado: 18/06/2019. Aceptado: 20/06/2019.

**Carlos Villarroel González** (Autor de correspondencia). Licenciado en Ciencias de la Ingeniería e Ingeniero Civil Electrónico, Universidad de Tarapacá, Chile. Master en Ingeniería, Universidad de Estadual de Campinas, Brasil. DEA, Universidad Politécnica de Madrid, España. Profesor, Universidad de Tarapacá, Chile. Dirección: Escuela Universitaria de Ingeniería Eléctrica-Electrónica, Universidad de Tarapacá. 18 de septiembre #2222, Arica, Chile. e-mail: cvillar@uta.cl

**Vitelio Goykovic Cortés.** Ingeniero Agrónomo, Magíster

en Ciencias Agropecuarias mención Producción de Cultivos, Doctor en Ciencias Silvoagropecuarias y Veterinarias, Universidad de Chile. Profesor, Universidad de Tarapacá, Chile. e-mail: vgoykovi@uta.cl

**Patricio Collao Caiconte.** Licenciado en Ciencias de la Ingeniería, Ingeniero Civil en Computación e Informática y Magíster en Ingeniería de Software, Universidad de Tarapacá, Chile. Académico, Universidad de Tarapacá, Chile. e-mail: patricio.o.collao@gmail.com

**Manuel Barraza Rodríguez.** Licenciado en Ciencias de la

Ingeniería e Ingeniero Civil Electrónico, Universidad de Tarapacá, Chile. Académico, Universidad de Tarapacá, Chile. e-mail: mabarrazar@uta.cl

**Jorge Fernández Fuentes.** Licenciado en Ciencias de la Ingeniería e Ingeniero Civil Electrónico, Universidad de Tarapacá, Chile. e-mail: jorgeff804@gmail.com

**Álvaro Villarroel Figueroa.** Técnico Superior Agrícola y Licenciado en Ciencias Agronómicas, Universidad Iberoamericana, Chile. e-mail: alvillafi@gmail.com

**Ricardo Valdivia Pinto.** Ingeniero de Software, Universidad de

Santiago de Chile. Doctor en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Católica de Chile. Académico, Universidad de Tarapacá, Chile. e-mail: rvaldivi@uta.cl

**Cristóbal Castro Cruz.** Licenciado en Ciencias de la Ingeniería, Ingeniero Civil Mecánico y Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile. Doctor en Ingeniería Ambiental, Università Degli Studi Di Trento, Italia. Académico, Universidad de Tarapacá, Chile.

## PERFORMANCE EVALUATION OF A GREENHOUSE LOCATED IN THE ATACAMA DESERT, CHILE, THROUGH IoT

Carlos Villarroel González, Vitelio Goykovic Cortés, Patricio Collao Caiconte, Manuel Barraza Rodríguez, Jorge Fernández Fuentes, Álvaro Villarroel Figueroa, Ricardo Valdivia Pinto and Cristóbal Castro Cruz

### SUMMARY

*This work presents a remote evaluation of the behavior of a greenhouse located in the Atacama Desert, Northern Chile, in order to improve the efficiency of water use. The proposed monitoring architecture consisted of wireless devices connected via WiFi and wireless communication protocols of the IEEE such as 802.15.4. The devices used in the architecture were temperature and humidity sensors, connected to a wireless WiFi module, which sent the data to a router with 3G/4G connection. These data were complemented with sensors connected to a weather station that provides information on soil moisture and temperature. The infor-*

*mation obtained was sent through Internet of Things (IoT) protocols to a server in order to be processed. The data were presented on the platform (IoT Cloud). The purpose is to have real-time information, analyze it and make recommendations to the farmer regarding the behavior of the greenhouse. These evaluations were complemented with an analysis of water resources, salinity, and soil fertility. The crop used in the greenhouse were peppers (*Capsicum annum L.*). With the information generated in real time, it is made easy for the farmer to reach decisions regarding the greenhouse ventilation and the growing of peppers.*

## AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UMA ESTUFA LOCALIZADA NO DESERTO DE ATACAMA, CHILE, ATRAVÉS DE IoT

Carlos Villarroel González, Vitelio Goykovic Cortés, Patricio Collao Caiconte, Manuel Barraza Rodríguez, Jorge Fernández Fuentes, Álvaro Villarroel Figueroa, Ricardo Valdivia Pinto e Cristóbal Castro Cruz

### RESUMO

*Este trabalho apresenta uma avaliação remota do comportamento de uma estufa, localizada no deserto de Atacama, norte de Chile, realizada com a finalidade de melhorar a eficiência no uso da água. A arquitetura de monitoramento proposta se compõe de dispositivos sem fio conectados entre si por meio de rede WiFi e protocolos de comunicação sem fio da IEEE tais como 802.15.4. Os dispositivos utilizados na arquitetura consistiram em sensores de temperatura e umidade ambiental, conectados a um módulo sem fio WiFi, que enviou os dados para um roteador com conexão 3G/4G. Estes dados foram complementados com sensores conectados a uma estação meteorológica que proporciona informação da umidade e temperatura do*

*solo. Todos os dados obtidos foram enviados para um servidor, através de protocolos de Internet das Coisas (IoT) para serem processados. Estes dados foram apresentados na plataforma (IoT Cloud). O propósito é contar com informação em tempo real, analisá-la e realizar recomendações ao agricultor em relação ao comportamento da estufa. As avaliações se complementaram com uma análise do recurso hídrico, salinidade e fertilidade do solo. O cultivo utilizado na estufa foi pimentão (*Capsicum annum L.*). Com a informação gerada em tempo real se facilita a tomada de decisões do agricultor a respeito da ventilação da estufa e ligação da irrigação para o cultivo de pimentão.*

luminosidad ambiental, entre otras variables. El control de éstas, junto con formar parte del ambiente operacional de las plantas, también contribuye en la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (Allen *et al.*, 2006).

Existen muchas investigaciones en las que el uso de la tecnología IoT (del inglés, *Internet of Things*) ha dado buenos resultados, incluyendo el caso de la 'agricultura inteligente'. La implementación de las soluciones propuestas, requiere del uso de equipos costosos y difíciles de conseguir en el medio regional. La propuesta aquí presentada, es una

solución eficiente y de bajo costo para el monitoreo de estas variables agrícolas y es una alternativa de solución al uso eficiente de invernaderos en zonas desérticas, especialmente para la pequeña agricultura.

La necesidad de monitorear las condiciones climáticas al interior de un invernadero, utilizando una red de medición remota conectada a IoT, se hace evidente en esta propuesta, más aun tratándose de una zona desértica, nunca antes cultivada y de difícil acceso. La posibilidad de incorporar tecnologías relacionadas con IoT, en el monitoreo y en la evaluación de las

distintas etapas fenológicas de un cultivo resulta determinante para una efectiva toma de decisiones (Ashraf *et al.* 2016).

A la incorporación de las tecnologías de información y comunicación (TIC) para adecuar el manejo de suelos y cultivos a la variabilidad natural, presente dentro del agrosistema se le conoce como 'agricultura de precisión' (AP), dado que dentro de un predio está la probabilidad de que existan sectores donde se produzca más y otros donde la producción sea menor. Esta variabilidad se explica por una composición diferente del suelo, sea su profundidad, textura,

estructura, pedregosidad, pendiente, orientación y fertilidad entre otros factores. El término agronómico AP define la gestión de parcelas agrícolas sobre la base de la observación, la medida y la actuación frente a la variabilidad inter- e intra-cultivo; no solo pretende controlar los efectos de esta variabilidad, potenciando mayores rendimientos a partir del mejor aprovechamiento de los recursos, sino que también apunta a fortalecer la sostenibilidad social, ambiental y económica de los productores (IICA, 2014). En la agricultura, el IoT es una tendencia tecnológica que se ha utilizado en la

última década para mejorar las técnicas de automatización agrícola. Una de las tecnologías utilizadas en la implementación de un invernadero inteligente es el uso de las redes de sensores inalámbricos (WSN, del inglés *Wire Sensor Network*). El propósito de este estudio fue evaluar el comportamiento de las variables temperatura y humedad ambiental en un invernadero ubicado en un ecosistema desértico cultivado con pimentón, hortaliza de gran demanda en el mercado chileno. El invernadero empleado se halla en la localidad de Pampa Concordia, Comuna de Arica, Región de Arica-Parinacota, ubicada en 18°20'42"S y 70°18'15"O y 105msnm. El predio forma parte de un terreno de 350ha perteneciente a la agrupación de agricultores 'Pampa Concordia'.

Con el fin de contar con antecedentes del suelo a cultivar se cuantificó su fertilidad, tanto antes de cultivarlo como después de 15 días de haberlo regado, con el fin de dimensionar las necesidades de nutrientes, la disponibilidad de estos para las plantas, detectar las necesidades de enmiendas y seleccionar el tipo de fertilizante a emplear, entre otros objetivos.

## Condiciones Agroecológicas para el Desarrollo y Crecimiento del Pimentón

### Temperatura

La temperatura mínima de crecimiento para el cultivo del pimentón es de 13°C, para un crecimiento óptimo es entre 21 y 25°C y la temperatura en floración ha de ser mayor a los 16°C (González, 2012). Según la empresa semillera Starkeyres (2014) las temperaturas óptimas para el crecimiento vegetativo del pimentón están entre 23 y 25°C. Brandenberger *et al.* (2017) consideran que el pimiento crece mal cuando las temperaturas se encuentran entre 4,4°C y 15,6°C y se produce muy poca fructificación si la temperatura durante el día supera los 32,2°C o es por debajo de 15,6°C en la noche; los frutos que se han desarrollado

sobre los 29,4°C suelen ser pequeños y deformados. Los mismos autores expresan que el rendimiento del pimentón es mejor cuando las temperaturas oscilan entre 18,3°C y 26,6°C durante el cuajado. Las temperaturas óptimas para la coloración de los frutos se encuentran entre 20 y 24°C. Temperaturas <18°C y >30°C afectan su color (Starkeyres, 2014). Por su parte, Kelley y Boyhan (2009) señalan que las temperaturas ideales durante el día se encuentran en el rango de 24 a 32°C y durante la noche entre 18 °C y 24°C.

### Humedad relativa (HR)

Para el desarrollo de la planta de pimentón, humedades relativas (HR) entre 65 y 85% son óptimas. Humedades superiores afectan la liberación y distribución del polen en el estigma y también se crea un ambiente favorable para el desarrollo de enfermedades foliares. Por el contrario, humedades bajas pueden causar infertilidad, debido al secado del polen antes de su germinación en el estigma, lo que conduce a frutos pequeños, deformes o planos. Con una humedad relativamente baja y una temperatura elevada, la tasa de transpiración de las hojas es rápida de modo que, si el sistema radicular no puede suministrar el volumen de agua requerido, puede ocasionar un marchitamiento parcial de la punta de crecimiento y aumentar la incidencia de podredumbre de la flor (Starkeyres, 2014).

### Déficit de presión de vapor (DPV)

El DPV es una manera práctica de caracterizar el clima de un invernadero. Corresponde a la diferencia entre la presión de vapor de saturación y la presión real de vapor en el aire ( $p_{v_{sat}} - p_{v_{aire}}$ ). Es una medida de valor que permite (Beluzán, 2013) relacionar la tensión actual a la que se hallan sometidas las partículas de agua en el aire (vapor) con respecto a las condiciones térmicas en donde este se saturaría, produciendo

la condensación (punto de rocío donde se produce la HR 100%). Su valoración facilita la toma de decisiones respecto a acciones tales como regular la humedad del invernadero a través de la ventilación, o accionar el sistema de riego, y también ayuda a prevenir enfermedades, tal como la podredumbre gris (*Botrytis cinerea*) en el pimiento (Rosa, 2005). Según Dik y Wubben (2007) citado por Beluzán (2013) el concepto de DPV es útil para el manejo climático de invernaderos, al representar un valor integrativo de las variables climáticas del invernadero como la temperatura y la humedad ambiental actuales, integrándolas en un solo valor. Así el DPV puede utilizarse para evaluar la amenaza de enfermedades, el potencial de condensación y las necesidades de un cultivo bajo invernadero (Robinson, 2010).

### Suelos

Los suelos más apropiados para el cultivo del pimentón son aquellos que presentan textura franca, estructura suelta, buen drenaje y pH óptimo entre 5,5 y 6,8 (4,5 y 8 como extremos). El pimentón presenta baja tolerancia a la salinidad del suelo y del agua de riego, considerándose adecuada una salinidad de 2,5mS·cm<sup>-1</sup> y una profundidad mínima de 0,6m. (González, 2012).

### Radiación solar / temperatura

En ambientes protegidos la radiación y la temperatura son factores que el agricultor necesariamente ha de gestionar dado los efectos que tienen en la fisiología, anatomía, morfología y rendimiento de las plantas. Así, el pimentón en estado de plántula es relativamente tolerante a la sombra; en el semillero, la aplicación de hasta un 55% de sombra aumenta el tamaño de las plantas, favoreciendo posteriormente la producción de más frutos y de tamaño más grande. La sombra tenue puede ser benéfica para el cultivo, por reducir el estrés de agua y disminuir el efecto

de la quema de frutos por el sol; sin embargo, el exceso de sombra reduce la tasa de crecimiento del cultivo y puede provocar el aborto de flores y frutos (Corpoica, 2014). De acuerdo a Lorenzo (2016) cuando se dispone de dispositivos para gestionar el sombreado móvil de invernaderos, considerar la temperatura y la radiación solar en forma conjunta permite una mayor precisión en el manejo del sombreado, pues se optimiza la integral de radiación que incide sobre el cultivo. La consigna de sombreado para el ciclo otoño-invierno y cuando el desarrollo foliar es bajo se activa si la temperatura interior del invernadero es >26°C y la radiación exterior es >500-600W·m<sup>-2</sup>. También se activa si el nivel de radiación es medio (300-400W·m<sup>-2</sup>) y la temperatura interior es >28°C. Si el desarrollo foliar es medio a alto la consigna opera si la temperatura es >28°C y la radiación exterior >600W·m<sup>-2</sup>. La consigna de sombreado para el ciclo primavera y cuando el desarrollo foliar es bajo se activa si la temperatura interior del invernadero es >28°C y la radiación exterior es >550-600W·m<sup>-2</sup>. Si el desarrollo foliar es medio a alto la consigna opera si la temperatura es >29°C y la radiación exterior >600-650W·m<sup>-2</sup> (Lorenzo, 2016).

## Metodología

### Arquitectura de plataforma

En esta investigación se trabajó con la arquitectura de plataforma de Ferrández-Pastor *et al.* (2016), modificada para nuestros propósitos. El principal nodo sensor utilizado en la WSN, fue el módulo ESP8266, que consiste de un chip integrado con conexión WiFi, compatible con el protocolo TCP/IP. La transmisión de datos se hizo por la red WiFi suministrada por un router 3G/4G. Como primer almacenador de datos se utilizó el dispositivo Raspberry Pi 3. El almacenamiento y la generación de gráficas se llevó a cabo en la plataforma IoT Cloud alojada en un servidor

propio. La plataforma empleada fue ThingsBoard, que es una plataforma IoT de código abierto. Para validar los datos obtenidos por la red de sensores se incorporó a la red una estación meteorológica Watchdog Serie 2000. La plataforma midió las variables climáticas dentro y fuera del invernadero.

#### Hardware utilizado

En esta arquitectura se utilizó el sensor DHT11 que proporcionó los valores de temperatura y humedad. El DHT11 es un sensor económico con el que se puede medir la temperatura entre 0 y 50°C con una precisión de  $\pm 2^\circ\text{C}$ , y la humedad entre 20% y 80% con una precisión de 5% (D-Robotics, 2010). Aunque el trabajo se realizó en un ambiente desértico, el rango medible de humedad relativa es restringido, pues algunas veces se pueden tener valores por encima del rango superior. El circuito ESP8266 es uno de los chips con WiFi integrado más usado, de dimensiones reducidas, integra el procesador Tensilica L106 de 32 bits, que presenta un consumo de energía muy bajo y un conjunto de instrucciones reducido de 16 bits. Alcanza una velocidad máxima de reloj de 160MHz. Este chip puede usarse como interfaz de sensores externos a través de una entrada/salida de propósito general (GPIO, del inglés *General Purpose Input/Output*). El GPIO es un pin genérico en un chip, cuyo comportamiento puede ser controlado por el usuario mediante programación. El ESP8266 cuenta con un kit de desarrollo de software (SDK, de *Software Development Kit*) que proporciona códigos de ejemplo para varias aplicaciones. Dispone del software necesario para la conexión del protocolo 802.11; es decir, para la conexión WiFi y funciona en el rango de temperaturas de -40 a +125°C. En esta arquitectura se utilizó el kit de desarrollo NodeMCU basado en el chip ESP8266, que tiene diez pines GPIO, los que pueden ser PWM, IIC, Serial y ADC. Es utilizado

para conectar elementos inteligentes con la filosofía de IoT, mediante el empleo de un firmware de código abierto. Con este kit se logra el control del hardware I/O mediante una API avanzada, consiguiendo una reducción del trabajo de configuración y manipulación de hardware mediante las herramientas de Arduino. Se utilizó el computador de placa reducida (SBC, de *Single Board Computer*) Raspberry Pi 3 modelo B, suficientemente potente, de bajo costo y versátil, para ejecutar controles adicionales. Este consta con cuatro puertos USB, un puerto RJ45 y 1GB de RAM. En la Tabla I se presenta las características más relevantes de los componentes del software utilizado.

#### Protocolo de comunicación

Acorde con los requerimientos de la estructura, se utilizó el protocolo MQTT (*Message Queue Telemetry Transport*), que cumple con los requerimientos señalados. Este es un protocolo de conectividad máquina a máquina (M2M), utilizado en IoT y por dispositivos conectados en redes con limitaciones de recursos, como el ancho de banda. Una de las principales finalidades de este protocolo es minimizar el ancho de banda necesario para el envío de información y reducir los recursos necesarios para los dispositivos, sobre todo en los casos que empleen sistemas inalámbricos. Se debe considerar que los dispositivos tienen limitaciones en su batería (duración de carga vs consumo eléctrico) y memoria, entre otros. El protocolo MQTT versión 3.1.1 fue implementado con 'Mosquitto' que es un broker MQTT de código abierto que lo convierte en un servidor adecuado para la implementación de IoT en sistemas con recursos limitados y está destinado para uso en cualquier situación en la que exista la necesidad de mensajería ligera, tanto en máquinas muy potentes como en sistemas de baja potencia. La implementación actual de Mosquitto tiene

TABLA I  
DISPOSITIVOS UTILIZADOS PARA LAS MEDICIONES

Kit de desarrollo	Node MCU 1.0 ESP8266
Single board computer	Raspberry Pi B+
Sensor de temperatura y humedad	DHT 11
Sensor humedad de suelo	WaterScout SM100
Sensor temperatura de suelo	Watchdog external sensor 3667
Estación meteorológica	Watchdog Series 2000, 2250

un ejecutable cuyo tamaño se encuentra en torno a los 120KB y cuyo consumo requiere aproximadamente 3MB de RAM si llegarán a conectarse 1000 usuarios simultáneamente.

#### Componentes de la plataforma

La arquitectura de la plataforma empleada se presenta en la Figura 1. Sus componentes principales son: *Cloud*, *Communication*, *Edge Layer* y *Things*. Cada componente se describe a continuación.

**Cloud.** Las plataformas IoT Cloud son un aspecto crucial en IoT. Ray (2016) reúne y compara plataformas existentes que pueden utilizarse. También se suman trabajos que implementan su propia plataforma IoT Cloud, por ejemplo Mamani *et al.* (2017). La plataforma IoT Cloud seleccionada fue Thingsboard por responder a los requisitos mínimos de la arquitectura presentada en la Figura 1, además es una solución *open source* que permite el libre hospedaje en un servidor y presenta las características más usadas en una

plataforma IoT Cloud, que son: conectarse con protocolos estándares de IoT (MQTT, CoAP y HTTP), permitir la recolección de datos, visualizar la información en paneles personalizables y permitir el procesamiento basado en reglas.

**Communication.** Esta capa representa todos los modos de comunicación utilizados en la arquitectura. Se utiliza entre las capas Edge Layer y Things. El WiFi comunica el ESP8266 con el Raspberry Pi 3. La Red móvil 3G/4G es la única vía de comunicación entre Edge Layer y Cloud, y comunica el Raspberry Pi 3 con Thingsboard. Los demás dispositivos, tales como notebooks, computadores o teléfonos inteligentes, pueden acceder a Cloud desde cualquier lugar con una conexión a Internet, hecho muy importante para los usuarios.

**Edge Layer.** Esta capa de la arquitectura utilizada, cumple principalmente con dos funciones: 1) Ser el puente entre las capas Things y Cloud, actuando como un control centralizado entre ambas, lo que permite

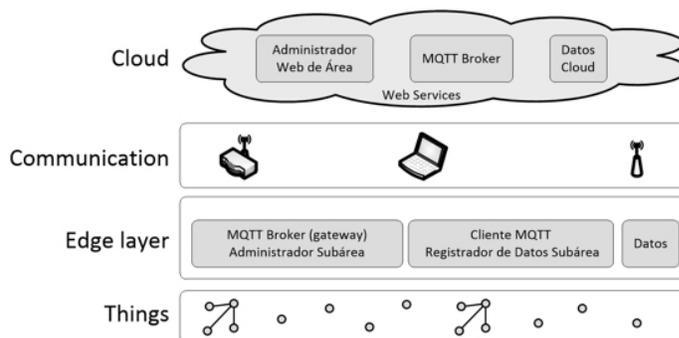


Figura 1. Arquitectura del sistema basada y modificada de Ferrández-Pastor *et al.* (2016).

separar las comunicaciones internas (Things) de las externas (Cloud) y posibilita la implementación de mecanismos de control complejo, que pueden requerir capacidad de procesamiento. 2) Almacenar datos de respaldo, para mantener un registro adicional de mediciones y eventos del último periodo. La función 1 corresponde al componente 'Administrador Subárea', mientras que la función 2 corresponde a los componentes 'Registrador de Datos Subárea' y 'Datos' de la Figura 1. Esta capa recibe las mediciones captadas en la capa Things y las envía a Cloud para su registro y análisis, mediante el protocolo MQTT. El dispositivo Raspberry Pi 3 se encarga de hospedar esta capa. El servicio MQTT es proporcionado por el software Mosquitto, que se ejecuta sobre el Sistema Operativo Raspbian del Raspberry Pi 3. Adicionalmente, el almacenamiento de datos de respaldo se realizó a través de un programa desarrollado para este trabajo. El programa fue elaborado en el lenguaje de programación Python. Este recibe los datos mediante MQTT y los guarda en el almacenamiento interno del dispositivo.

**Things.** Corresponde a la capa en que se encuentran los nodos con sus sensores, contemplando por cada nodo las entradas y salidas distribuidas más los módulos de procesamiento, que funcionan aprovechando las facilidades de comunicación. En este caso, cada nodo está compuesto por un micro controlador ESP8266.

#### Implementación del sistema agrícola

Para operacionalizar la propuesta precedente del monitoreo en forma remota de una plantación bajo invernadero, se cultivó pimentón (*Capsicum annuum* L.) variedad dulce y se instalaron en la estructura un sensor de humedad de suelo WaterScout SM100 y un sensor de temperatura de suelo Watchdog external sensor 3667, ambos conectados a una

estación meteorológica Watchdog Series 2000, 2250. Se utilizó un invernadero de polietileno con espesor de 0,15mm, de tipo túnel de 80×65m y una altura máxima de 3,9m, construido con orientación norte-sur. En los costados tenía malla antitrips de 20×10 hilos/cm<sup>2</sup> y a la vez polietileno, como protección para el frío. El polietileno se recogía en el día, y al atardecer se bajaba para guardar la temperatura interior. La red de riego contaba con dos estaciones, cada una de 30 líneas y cada línea de 40m de largo. Para la cuantificación de la fertilidad y salinidad del suelo se procedió de acuerdo a los protocolos descritos por Sadzawka *et al.* (2006). Con el fin de conocer sobre la calidad del recurso hídrico se analizó el agua que dispone el predio por el método propuesto por Sadzawka (2006).

#### Cultivo

El cultivo de pimentón fue monitoreado a través del IoT, durante cinco meses (mayo-septiembre). El cultivo fue trasplantado el 10 de abril de 2018, de modo que se monitoreó 30 días de crecimiento vegetativo, 90 días en que la planta se encontraba en floración, y 100 días de fructificación. Considerando que el suelo era cultivado por primera

vez se instaló en cada hilera a cultivar dos cintas de riego por goteo, cuyos emisores arrojaban un caudal de 2 l·h<sup>-1</sup> y estaban separados uno de otro por 20cm. De esta forma se regaron las hileras durante 15 días, 30min en la mañana y 30min en la tarde. Se aplicaron 8ton·ha<sup>-1</sup> de guano de cordero, fertyeso, y abono complex, en forma localizada y superficial en donde irían las líneas de cultivo, incorporándose luego al suelo con un rotovator. Para el buen desarrollo del cultivo se fertilizó considerando los resultados del análisis de suelo (Tabla II) y se controlaron algunas plagas que afectaron al pimentón.

#### Resultados

El suelo utilizado, tal como se espera en este ambiente de extrema aridez, es extremadamente salino; la conductividad eléctrica (CE) en extracto saturado excede los 16,0mS·cm<sup>-1</sup> (Fundación Produce Nayarit, 2010) con una alta presencia de sulfatos, cloruros, calcio y sodio. Por su pH este recurso es medianamente básico (Tabla II). Sin embargo, el agua disponible fue de buena calidad dada su concentración de boro (0,94mg·l<sup>-1</sup>) y una CE de 0,94mS·cm<sup>-1</sup> (Tabla III) lo que permitió reducir la salinidad del suelo de 24,12 hasta

10,62mS·cm<sup>-1</sup>. En la Tabla IV se presenta un resumen con las mediciones efectuadas por el sistema implementado, respecto a las temperaturas y humedades ambientales.

Los gráficos con los valores de humedad y temperatura ambiental durante los días que se realizaron mediciones se presentan en las Figuras 2, 3 y 4. Los datos obtenidos por los sensores de humedad y temperatura de suelo, conectados en la estación meteorológica, nos presentan en detalle la variación de estos parámetros a lo largo del día. Si bien el patrón de variación de la humedad y temperatura de suelo es muy similar en los días en que se realizaron mediciones, es posible observar en cuales horarios la disminución de humedad en el suelo es más notoria.

Desde las 00:00 hasta las 9:30 la humedad presente en el suelo varía desde el 69% hasta un 64%, a partir de este momento la humedad del suelo desciende hasta un valor de 30% y vuelve a subir luego de realizarse los dos riegos diarios a las 11:00 y 15:00, volviendo a estabilizarse a las 18:00 en un valor de 60%. Lo mismo ocurre de manera muy similar con la temperatura de suelo. La temperatura de suelo desde las 00:00 hasta las 10:00 varía entre 17 y 19°C, aumentando de manera rápida y

TABLA II  
FERTILIDAD EN SUELO CULTIVADO Y NO CULTIVADO

	Forma	Unidad	Suelo cultivado	Suelo no cultivado
Conductividad eléctrica extracto		mS·cm <sup>-1</sup>	10,62	24,12
pH			7,20	7,60
Nitrógeno disponible	N	mg·kg <sup>-1</sup>	2,23	4,15
Potasio disponible	K	mg·kg <sup>-1</sup>	752,50	577,50
Materia orgánica		%	< 1,00	< 1,00
<b>Salinidad</b>				
Calcio	Ca <sup>2+</sup>	mg·l <sup>-1</sup>	1020,00	2789,22
Magnesio	Mg <sup>2+</sup>	mg·l <sup>-1</sup>	268,50	468,00
Potasio	K <sup>+</sup>	mg·l <sup>-1</sup>	276,00	204,00
Sodio	Na <sup>+</sup>	mg·l <sup>-1</sup>	756,00	1560,00
Cloruros	Cl <sup>-</sup>	mg·l <sup>-1</sup>	1979,40	4419,75
Sulfatos	SO <sup>2-</sup>	mg·l <sup>-1</sup>	2448,00	5146,00
Nitratos	NO <sup>-</sup>	mg·l <sup>-1</sup>	0,00	0,00
Bicarbonatos	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg·l <sup>-1</sup>	183,00	255,00
Carbonatos	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	mg·l <sup>-1</sup>	ND	ND
Fosfatos	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	mg·l <sup>-1</sup>	27,71	9,29
Boro	-----	mg·l <sup>-1</sup>	2,10	5,15
RAS			3,14	4,15

TABLA III  
MUESTRA DE AGUA

Parámetro	Unidad	Forma	Pozo
Ce	mS·cm <sup>-1</sup> a 25 °C		0,94
pH			7,35
Calcio	mg·l <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	94,15
Magnesio	mg·l <sup>-1</sup>	Mg <sup>2+</sup>	18,40
Potasio	mg·l <sup>-1</sup>	K <sup>+</sup>	8,12
Sodio	mg·l <sup>-1</sup>	Na <sup>+</sup>	92,60
Cloruros	mg·l <sup>-1</sup>	Cl <sup>-</sup>	167,36
Sulfatos	mg·l <sup>-1</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	204,14
Nitratos	mg·l <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	6,48
Bicarbonatos	mg·l <sup>-1</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	80,00
Carbonatos	mg·l <sup>-1</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	ND
Fosfatos	mg·l <sup>-1</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	ND
Boro	mg·l <sup>-1</sup>	----	0,94

significativa hasta alcanzar los 30°C. Esto es regulado por medio del primer riego efectuado a las 11:00 y así la temperatura baja a 25°C, posteriormente con el segundo riego de las 15:00 la temperatura vuelve a bajar y se mantiene estable en 17°C hasta el día siguiente. Esto es coherente con los horarios de riego evidenciándose un aumento de la humedad en las horas de riego y una disminución fuera de esos periodos.

En estas condiciones de manejo del cultivo, y la calidad de los recursos naturales disponibles se logró obtener hasta fines de septiembre un rendimiento de 20.600kg·ha<sup>-1</sup> restando dos meses para que finalice el cultivo.

### Análisis y Discusión de Resultados

#### Temperatura ambiental al interior del invernadero

Los valores de temperatura ambiental registradas en el mes de mayo (Figura 2) corresponden a una máxima de 34,8°C y una mínima de 12,0°C, con un promedio mensual de 20,3°C. Las plantas en este periodo se encuentran en su fase de crecimiento vegetativo (0 a 50 días), Al considerar la temperatura promedio, Ruiz *et al.* (2013) expresa que el valor óptimo está entre 18 y 24,5°C de modo que el cultivo está en el rango requerido. Sin embargo, al

tener en cuenta los valores extremos, González (2012) señala que el óptimo para esta fase es de 23 y 25°C, mientras que Ruiz *et al.* (2013) indican que para este estado fenológico las temperaturas diurnas deben estar comprendidas entre los 20 y 25°C y las temperaturas nocturnas entre 16 y 18°C, y de acuerdo a Starkeyres (2014) la temperatura mínima para este estadio es de 21°C y máximo 28°C, de modo que las plantas en estos extremos de temperaturas máximas y mínimas estarían sometidas a un estrés térmico. Por tanto, el agricultor debería considerar el uso de mecanismos para controlar la temperatura como riego por nebulización, ventilación, uso de cortinas que le permitan acercarse a las temperaturas óptimas. Este aspecto es uno de los que se persigue enfatizar con esta investigación.

En el mes de junio (Figura 3) las temperaturas ambientales máxima y mínima fueron de 33,4 y 13,0°C respectivamente, y la temperatura promedio fue de 19,2°C. Desde inicio de este mes y durante 100 días más las plantas florecen y desde el día 20 de junio comienza la fructificación. En estas fases del ciclo de vida de la planta, de acuerdo a De Vilmorín Díaz (1977), temperaturas >32°C provocan la caída de flores. Al respecto INIA (2018) expresa que la temperatura óptima para la floración y fructificación es de 26-28°C durante el día y 18 a 20°C por la noche, mientras que la mínima es de 18°C y la máxima 35°C. De acuerdo a esta información la temperatura promedio registrada está dentro de los límites apropiados. No obstante, la preocupación se centraría en el control de las temperaturas nocturnas, dado que habría noches en la

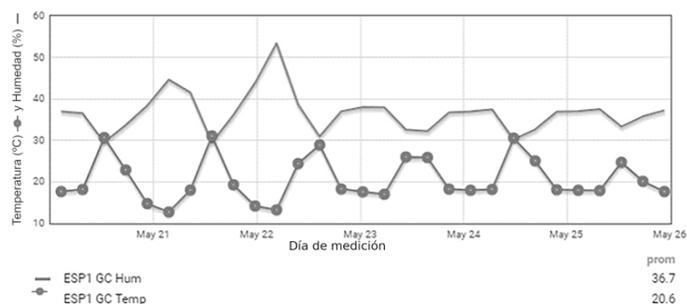


Figura 2. Mediciones realizadas durante el mes de mayo.

TABLA IV  
RESUMEN DE DATOS OBTENIDOS POR LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN Y LOS SENSORES DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA

Mes	Temp. máxima registrada (°C)	Temp. mínima registrada (°C)	Temp. promedio (°C)	Humedad máxima registrada (%)	Humedad mínima registrada (%)	Humedad promedio (%)
Ambiental						
Mayo	34,83	12	20,33	56,67	27,83	36,62
Junio	33,4	13	19,16	64,87	33,4	38,78
Julio	33,25	11,33	18,57	62,67	28,75	41,25
Agosto	40,55	19,44	21,11	96,2	34	68,73
Septiembre	37,25	11,44	19,75	91,5	32,3	66,87
Suelo						
Mayo	32,7	11,8	20,1	91,9	26	64,74
Junio	30,2	11,8	18,35	94,7	32,9	69,87
Julio	28,2	10,6	17	92,6	34,6	72,85
Agosto	27,22	10,27	17,2	93,5	43,2	78,56
Septiembre	28,38	11,32	18,09	95,3	41,1	77,34

cual la temperatura está por debajo de la mínima en 5°C, y también no se ha de descuidar la temperatura máxima, puesto que sobre 35°C se produce la caída de las flores.

En el mes de julio (Figura 4) la temperatura máxima registrada fue de 33,3°C mientras que en agosto y septiembre las máximas detectadas alcanzaron los 40,6°C y 37,3°C; las temperaturas ambientales mínimas fueron de 11,3; 19,4 y 11,4°C, respectivamente. En estos meses las plantas continúan floreciendo y fructificando, a la vez que empieza a producirse la maduración de los frutos, desde el 10 de julio, proceso que se

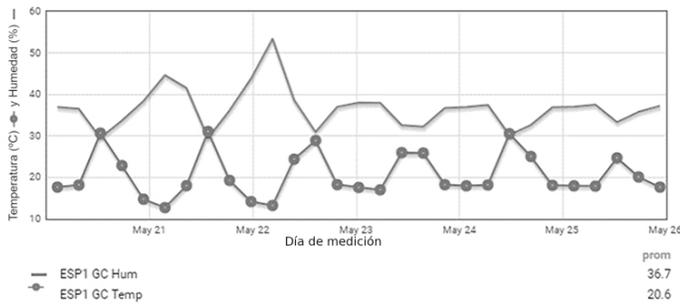


Figura 3. Mediciones realizadas durante el mes de junio.

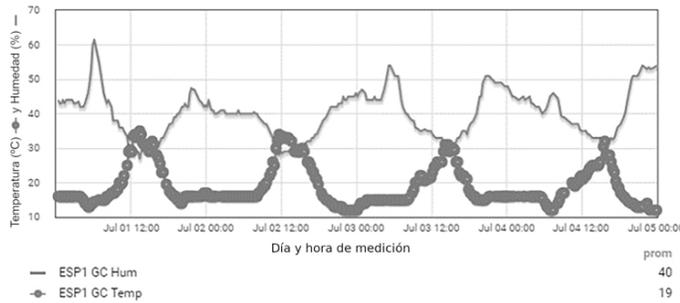


Figura 4. Mediciones realizadas durante el mes de julio.

extenderá por 100 días. Los requerimientos térmicos en este periodo son los mismos señalados para el mes de junio. De modo que la temperatura máxima de agosto (40,6°C) sin duda tuvo consecuencias negativas en el cultivo como caída de flores (INIA, 2018) y bloqueo del proceso de fructificación (De Vilmorin Díaz, 1977). Las temperaturas promedio estuvieron entre los 18,6 y 21,1°C, las cuales se ajustan a las de los rangos óptimos para estas etapas fenológicas del cultivo.

#### Humedad ambiental y DPV

En los cinco meses en que se registraron los datos de humedad relativa solo en los dos últimos (agosto y septiembre) la humedad relativa máxima fue superior al 70%, porcentaje máximo recomendable, hecho que afectaría a la liberación y distribución del polen en el estigma, y a la vez se crearía un ambiente favorable para que se expresen enfermedades (Starkeyres, 2014). Mientras que todas las humedades mínimas de los meses en que se

realizó el ensayo estuvieron por debajo de la humedad mínima recomendable del 50% (Corpoica, 2014). Al considerar la humedad relativa promedio en mayo, junio y julio se registraron valores de 36,6; 38,8 y 41,3% respectivamente, los cuales estarían fuera del rango óptimo. De acuerdo a estos resultados en agosto y septiembre debe de conjugarse en un mejor término la ventilación, el control de la temperatura y evitar un exceso de humedad en el suelo del invernadero, y de mayo a septiembre prestar atención al manejo del riego, de forma de evitar descensos de la humedad que pueden tener como consecuencias el secado del polen antes de su germinación en el estigma, lo que conduce a frutos de reducido tamaño, deformes o planos Starkeyres (2014). En los meses de agosto y septiembre se registraron puntualmente las máximas humedades relativas (96,2 y 91,5%), no obstante los promedios mensuales de éstas se encontraron en el rango de las humedades óptimas (Starkeyres, 2014). Al

relacionar la humedad máxima con la temperatura mínima ambiental de agosto (19,4°C) se genera un DPV de 0,086kPa. Esta situación facilita, en esas condiciones, la manifestación de enfermedades por patógenos fúngicos dado que éstos sobreviven por debajo de los 0,43kPa, y menos de 0,20kPa, las infecciones que producen resultan en un mayor daño. Resultados semejantes se producen en septiembre, con 91,5% de humedad relativa y temperatura mínima de 11,4°C, que producen un DPV de 0,115kPa. Por ello se recomienda, cuando se presenten déficit de presión de vapor de estas magnitudes, regular el clima del invernadero a valores >0,20kPa (Robinson, 2010).

#### Radiación solar y temperatura

Desde que se trasplantó el pimentón y durante todo su crecimiento vegetativo las plantas estuvieron sometidas todos los días a radiaciones solares externas elevadas, que alcanzaron los 797,9W·m<sup>-2</sup>, como también a altas temperaturas interiores que en algunos momentos llegaron a 34,8°C. En estas ocasiones, si el agricultor se percataba de esta situación, regaba y subía las cortinas laterales de polietileno, de modo de estabilizar a ~25°C.

Desde inicio de floración a inicio de fructificación solo existieron cuatro días en que la radiación no superó los 500W·m<sup>-2</sup>, alcanzándose una máxima de 693,0W·m<sup>-2</sup>. La temperatura máxima, tras su regulación por el agricultor, alcanzó en este periodo fenológico los 26,8°C.

Al día 70, inicio de fructificación, periodo en que también la planta continúa floreciendo, y hasta fines de septiembre, la radiación solar externa todos los días, excepto nueve días, registro valores sobre los 500W·m<sup>-2</sup>. El máximo de radiación externa registrada fue de 857,9W·m<sup>-2</sup>.

Desde los inicios del cultivo hasta septiembre, mes en que finalizó el seguimiento al cultivo, fueron escasos los días en que la radiación solar no

superase los 500W·m<sup>-2</sup>, de modo que la definición de consignas para ventilar el invernadero y automatizar los sistemas de enfriamiento son del todo necesarias.

El IoT consiste en la interconexión de cualquier objeto o producto con cualquier otro a través de la red. Entre las capacidades del IoT encontramos: comunicación y cooperación, capacidad de direccionamiento, identificación, localización y actuación. Para que todas estas capacidades se conviertan en ventajas, es necesario aplicar la tecnología en función de las necesidades de cada ámbito. Así, en el caso actual, la utilización de sensores con IoT facilita la integración de los datos clave de temperatura y humedad en sistemas de información, permitiendo realizar un análisis detallado de los datos y también eventualmente, automatizar actuadores de un sistema de enfriamiento para invernaderos.

#### Conclusiones

El monitoreo en forma remota del comportamiento de las variables abióticas del invernadero, a través de sensores que envían la información a través de internet, facilitó al productor la toma de decisiones respecto a implementar acciones, de acuerdo a los medios disponibles, tendientes a ajustar estos factores a lo deseable para el cultivo, en todos sus estados fenológicos.

La incorporación de dispositivos tecnológicos mecanizados en el invernadero, posibles de controlar remotamente, contribuiría en mejores términos a optimizar el ambiente operacional de las plantas y por ende obtener un mayor rendimiento, calidad de las cosechas y con menos problemas fitosanitarios.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Proyecto Mayor UTA 8734-17, Universidad de Tarapacá y la colaboración de Gloria Castro C., quien facilitó sus instalaciones para este trabajo.

## REFERENCIAS

- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (2006) *Evapotranspiración del Cultivo. Guías para la Determinación de los Requerimientos de Agua de los Cultivos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 300 pp.
- Ashraf A, Zakaria A, Kamarudin LM, Bakar AHA (2016) Internet of Things Technology for Greenhouse Monitoring and Management System Based on Wireless Sensor Network. *ARN J. Eng. Appl. Sci.* 11: 13169-13175.
- Beluzan FJ (2013) *Déficit de Presión de Vapor (dpv) y Factores Microclimáticos como Herramientas de Pronóstico de Botrytis cinerea Pers. ex Fr., en Lactuca sativa L. Bajo Invernadero*. Tesis. Universidad Austral de Chile. 113 pp.
- Brandenberger L, Kahn BA, Eric Rebek E, Damicone J (2017) *Pepper Production*. Oklahoma Cooperative Extension Service. Oklahoma State University. 3 pp. <http://pods.dasn.okstate.edu/docushare/dsweb/Get/Document-1041/F-6030web.pdf> (Cons. 27/09/2018).
- Cartes GS (2013) *Degradación de Suelos Agrícolas y el SIRSD-S*. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Ministerio de Agricultura. Chile. 6 pp.
- Corpoica (2014) *Modelo productivo del pimentón bajo condiciones protegidas en el Oriente Antioqueño*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria y Gobernación de Antioquia. Colombia. 171 pp.
- D-Robotics (2010) *DHT11 Technical Data Sheet*. <https://www.mouser.com/ds/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf> (Cons. 07/08/2018).
- De Vilmorín Díaz F (1977) *El Cultivo del Pimiento Dulce Tipo Bell*. 1ª ed. Diana. México. 314 pp.
- FAO (2015) *Boletín del Año Internacional de los Suelos América Latina y el Caribe*. Boletín N°1.
- Ferrández-Pastor FJ, García-Chamizo JM, Nieto-Hidalgo M, Mora-Pascual J, Mora-Martínez J (2016) Developing ubiquitous sensor network platform using internet of things: Application in precision agriculture. *Sensors* 16:1141.
- Fundación Produce Nayarit (2010) *Salinidad del Suelo*. Gobierno Federal. México. 59 pp. <https://www.cofupro.org.mx/cofupro/images/contenidoweb/indice/publicaciones-nayarit/FOLLETOS%20Y%20MANUALES/FOLLETOS%20IMTA%202009/folleto%206%20salinidadelsuelo.pdf> (Cons. 15/10/2018).
- Gil E (2010) *Situación Actual y Posibilidades de la Agricultura de Precisión*. Universidad Politécnica de Catalunya. España. 47 pp.
- González MI (2012) *Nuevas Fichas Hortícolas*. Centro Regional de Investigación Quilamapu. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Ministerio de Agricultura. Chile. 59 pp.
- IICA (2014) *Manual de Agricultura de Precisión*. Editores: Mantovani EC, Magdalena C (Eds.). Procisur, IICA. Montevideo, Uruguay. 178 pp.
- INIA (2018) *Pimientos para la Industria de Alimentos e Ingredientes*. Pino MT (Ed.) Boletín N° 360. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Santiago, Chile. 113 pp.
- Kelley T, Boyhan G (2009) Pepper history, scope, climate and taxonomy. En *Commercial Pepper Production Handbook*. Bulletin 1309. Rev. 03/2009. pp 3-4.
- Lorenzo P (2016) *Sombreado. Estrategias de Manejo en Función de las Variables Climáticas y la Fenología del Cultivo*. Jornadas sobre el Control del Clima en el Invernadero. IFAPA La Mojonera. Almería, España. 42 pp.
- Mamani M, Villalobos M, Herrera R (2017) Sistema web de bajo costo para monitorear y controlar un invernadero agrícola. *Ingeniare* 25: 599-618.
- Ray PP (2016) A survey of IoT cloud platforms. *Fut. Comput. Informat. J.* 1: 35-46.
- Robinson J (2010) *Utiliza el Déficit de Presión del Vapor en Invernadero*. <https://www.hortalizas.com/horticultura-prottegida/invernadero/utiliza-el-deficit-de-presion-del-vapor-en-invernadero/> (Cons. 28/09/2018).
- Rosa E (2005) *Conjunto Tecnológico para la Producción de Pimiento- Enfermedades*. Universidad de Puerto Rico. 9 pp.
- Ruiz JAC, García GM, González IJA, Flores HEL, Ramírez GO, Ortiz CT, Byerly KFM, Martínez RAP (2013) *Requerimientos agroecológicos de cultivos*. Libro Técnico N° 3. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México. 578 pp.
- Sadzawka AR (2006) *Métodos de Análisis de Aguas de Riego 2006*. Serie Actas INIA N° 37. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Chile. 332 pp.
- Sadzawka AR, Carrasco MA, Grez RZ, De La Luz MM, Flores HP, Neaman A (2006) *Métodos de Análisis Recomendados para los Suelos de Chile*. Serie Actas INIA N° 34. Rev. 2006. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Chile. 164 pp.
- Starkeyayres (2014) *Sweet & Hot Peppers Production Guideline*. 12 pp. [https://www.starkeyayres.co.za/com\\_variety\\_docs/Sweet-&-Hot-Pepper-Production-Guideline-2014.pdf](https://www.starkeyayres.co.za/com_variety_docs/Sweet-&-Hot-Pepper-Production-Guideline-2014.pdf) (Cons. 03/10/2018).