

Sistema de riego por goteo automático utilizando una red de sensores inalámbricos

Efraín Mayhua-López

Doctor y Máster en Multimedia y Comunicaciones por la Universidad Carlos III de Madrid (España). Máster en E-Business: Telecomunicaciones y nuevos modelos de negocios por la Universidad de Cantabria (España). Ingeniero Electrónico. Es Docente Investigador de la Universidad Católica San Pablo y Director del centro de Investigación en Electrónica y Telecomunicaciones de dicha universidad.

Contacto: emayhua@ucsp.edu.pe

Jimmy Ludeña-Choez

Doctor y Máster en Multimedia y Comunicaciones en la especialidad de Tratamiento de Señales y Datos por la Universidad Carlos III de Madrid (España). Ingeniero Electrónico por la Universidad Nacional de San Agustín. Es miembro del Grupo de procesamiento multimedia del Departamento de Teoría de la Señal de la Universidad Carlos Tercero de Madrid. Es Docente Investigador de la Universidad Católica San Pablo.

Jorge Tamayo-Bedregal

Labora en la empresa Santa Gabriela S.A.C.

Mavileine Cuba-Reyes

Pertecene a la empresa Santa Gabriela S.A.C.

Ángela Nuñez-Zambrano

Trabaja en la empresa Santa Gabriela S.A.C.

Noelia Gonzales-Ale

Se desempeña laboralmente en la empresa Santa Gabriela S.A.C.

Daniel Lozada-Herrera

Pertecene a la empresa Santa Gabriela S.A.C.

Sistema de riego por goteo automático utilizando una red de sensores inalámbricos

Automatic Drip Irrigation System by using
a Wireless Sensors Network

Efraín Mayhua-López*, Jimmy Ludeña-Choez*, Jorge Tamayo-Bedregal**,
Mavileine Cuba-Reyes**, Ángela Núñez-Zambrano**, Noelia- Gonzales-Ale** y
Daniel Lozada-Herrera**

*Universidad Católica San Pablo, Arequipa, Perú**

*Santa Gabriela S.A.C., Arequipa, Perú***

Resumen

El agua es el elemento esencial para aprovechar el potencial de la tierra, su empleo y gestión constituyen un factor fundamental para elevar la productividad de la agricultura y asegurar una producción previsible. Según la FAO, al final del siglo XX, la agricultura ha empleado el 70% de toda el agua utilizada en el mundo y estima que el destinado a riego crecerá en 14% para el 2030. En el Perú, estas cifras son aún mayores, se utiliza el 80% del agua en agricultura y se estima que para el 2030 el consumo de agua en agricultura crecerá en 14%. El 40% de agua destinada para riego se desperdicia por diferentes factores, entre ellas una mala gestión en el riego o el uso de sistemas de riego tradicionales. A causa del cambio climático, en algunos lugares, la escasez de agua es cada vez mayor limitando la capacidad de producción local de alimentos. Para enfrentar dicha escasez y mejorar la rentabilidad agrícola, es decir producir más con menos agua, se hace latente la necesidad del desarrollo de prácticas de gestión eficiente del agua. En este trabajo, se presenta el desarrollo de un sistema de gestión inteligente de riego por goteo utilizando una red de sensores inalámbricos tipo *ZigBee*. El sistema está conformado por nodos terminales que se encarga de medir las condiciones ambientales del suelo haciendo uso de sensores de humedad, temperatura y conductividad eléctrica, nodos ruteadores encargados de actuar sobre las válvulas solenoides de riego y establecer una topología de comunicación tipo malla para, de este modo, encaminar las comunicaciones desde y hacia un nodo coordinador. El nodo coordinador envía los datos del campo hacia un servidor donde se instala un software de gestión y control predictivo que de acuerdo con los valores de las condiciones ambientales envía ordenes primero hacia un controlador que acciona la bomba principal y segundo hacia las válvulas solenoides utilizando la red de comunicaciones tipo malla establecido por el nodo coordinador y los nodos ruteadores. La gestión y control de las funcionalidades del servidor se pueden realizar de forma remota mediante cualquier dispositivo que esté conectado a Internet, incluso desde dispositivos móviles.

Palabras clave:

Redes de sensores, riego por goteo, riego inteligente, control automático de riego.

Summary

Water is the essential element for harnessing the potential of land, its use and management is a key factor in raising the productivity of agriculture and ensuring predictable production. According to the FAO, at the end of the 20th century, agriculture has used 70% of all water used in the world and estimates that irrigation will grow by 14% by 2030. In Peru, these numbers are even higher, 80% of water is used in agriculture and it is estimated that by 2030 water consumption in agriculture will grow approximately 14%. 40% of water destined for irrigation is wasted by different factors, including poor management of irrigation or use of traditional irrigation systems. As a result of climate changes, in some places, the scarcity of water is increasingly limiting the ability of local food production. In order to face this shortage and improve agricultural profitability, this means to produce more with less water, the need to develop efficient water management practices becomes latent. In this paper, the development of an intelligent drip irrigation management system using a ZigBee wireless sensor network is presented. The system is made up of nodes that are responsible for measuring the environmental conditions of the ground using moisture sensors, temperature and electrical conductivity. Router nodes are in charge of acting on the irrigation solenoid valves and establish a mesh-type communication topology in order to route communications to and from a coordinating node. The coordinating node sends the data from the field to a server where a management and predictive control software is installed that according to the values of the environmental conditions, sends orders first to a controller that drives the main pump and second to the solenoid valves using the Network of mesh type established by the coordinating node and the routing nodes. The management and control of server functionalities can be performed remotely by any device that is connected to the Internet, even from mobile devices.

Key words:

Sensor networks, drip irrigation, intelligent irrigation, automatic irrigation control.

Introducción

El crecimiento de la población mundial está generando una serie de necesidades. Según el *World Population Prospects* (2015) de la Organización de Naciones Unidas (ONU) (United Nations, 2015), la población mundial en la actualidad es de aproximadamente 7.4 millones y se estima que para el año 2050, esta se incrementará hasta los 9.7 millones de personas. Este crecimiento genera una serie de necesidades, principalmente mayor producción de alimentos y de forma sostenible. Una mejora en la producción de alimentos implica mejorar la productividad de los cultivos, aumento de los campos de cultivo y por ende un mayor consumo de agua.

El agua es el elemento esencial para aprovechar el potencial de la tierra; en el mundo, su empleo y gestión es un factor fundamental para elevar la productividad de la agricultura

y asegurar una producción previsible. Según la Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO), al final del siglo XX, la agricultura ha empleado el 70% de toda el agua utilizada en el mundo y estima que la destinada a riego crecerá en 14% para el 2030. En el Perú, estas cifras son aún mayores, se utiliza el 80% del agua en agricultura y se estima que para el 2030 el consumo de esta en la agricultura crecerá en 14% (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013). Se calcula que el 40% de agua destinada a riego se desperdicia por diferentes factores; entre ellas, una mala gestión en el riego o el uso de sistemas de riego tradicionales. A causa del cambio climático, en algunos lugares, la escasez de agua es cada vez mayor, limitando la capacidad de producción local de alimentos. Para enfrentar dicha escasez y mejorar la rentabilidad agrícola; es decir, producir más con menos agua, se hace latente la necesidad del desarrollo de prácticas de gestión eficiente del agua (Singh, 2014).

El riego es la aplicación controlada de agua en áreas de cultivo por medio de sistemas artificiales que abastecen las necesidades de agua de los cultivos. Existen varios métodos de riego que se utilizan de formas diferentes en todo el mundo. Entre los más utilizados se pueden mencionar: el de *pivote central*, que es un riego por aspersión automatizado por rotación de una pluma de rociadores; el riego *por goteo*, que es un sistema planificado en que se aplica el agua directamente a la zona de raíces de las plantas por medio de goteros operados a baja presión; el de *inundación*, donde la aplicación de agua de riego en la superficie de la tierra se realiza dejando que esta se estanque; el riego *por surco*, método de inundación de superficie parcial de riego, donde se aplica agua en los surcos o filas del área de cultivo. Otros métodos utilizados son los de *gravedad y rotación*. En la obra de James (1987) se puede encontrar una amplia descripción de diferentes métodos de riego, procedimientos de diseño, aplicación en diferentes cultivos; además de ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

La gestión del riego se puede realizar mediante tres enfoques diferentes: por aproximación agro-meteorológica, según el comportamiento de las plantas y, de acuerdo con las condiciones ambientales del suelo. En el primer enfoque, la evaporación de la superficie de la planta se equipara a la evaporación de un cuerpo de agua sumando los ajustes apropiados, la evaporación a partir de un cuerpo de agua se ve afectada principalmente por un balance de energía y las condiciones del viento. El ajuste tiene en cuenta un coeficiente empírico de la planta (Allen, 2005), dado que la superficie de la hoja no es un cuerpo abierto y el área sobre el suelo que cubre la planta cambia durante el desarrollo del cultivo, el área de cobertura del suelo (área foliar) es muy difícil de medir y por lo general solo se estima mediante aproximaciones. En la práctica, se utilizan estaciones meteorológicas que miden las variables ambientales y calculan la evaporación potencial utilizando la ecuación de Penman Monteith (Allen, 2005).

El segundo enfoque, busca indicadores en la planta para determinar cuándo regar. Algunos de estos indicadores que han mostrado estar en correlación con el rendimiento de la planta son la conductancia estomática, fotosíntesis, crecimiento de las plantas, el tamaño del fruto, rendimiento, etc. El potencial hídrico del tallo al mediodía, el uso de la bomba Scholander (presión) (Powell & Coggins, 1985), son utilizados principalmente en la investigación con un intento de ampliar su uso en la práctica, ofreciendo un servicio adicional al agricultor. Esta técnica es destructiva, requiere calibración; afectada por las condiciones ambientales, otorga solo una guía al agricultor y no es en tiempo real (son necesarios mediciones de una vez por semana) y no se presta a la automatización (James, 1987). Un sistema alternativo es el uso de la dendrometría, pero requiere de calibración y su uso no puede ser comercializado. Además, los dendrómetros no se pueden utilizar con plantas herbáceas. En los últimos años se introdujo la medición del grosor de las hojas en un intento de medir la escasez de agua de la planta. Sin embargo, el espesor de la hoja está oscilando durante el día, a causa de cierre de los estomas para evitar el estrés y la deshidratación, y el cambio tiene que ser seguido por varios días y calibrado (Ballester, Buesa, Bonet & Intrigliolo, 2014). Otra técnica que se está explorando es la termometría de infrarrojos para el control de riego. La escasez de agua hace que la planta cierren las estomas causando un aumento de la temperatura de la hoja. Mediante fotografía infrarroja aérea, se puede apuntar a la escasez de agua y la necesidad de riego, pero esta técnica también requiere de calibración y su uso no es práctico hoy en día para un agricultor ordinario. La desventaja de todos los sistemas basados en plantas es el abandono de la tierra y la necesidad de aplicar el agua por ensayo y error (Gontia & Tiwari, 2008).

El tercer enfoque considera que el suelo es la reserva de agua para el crecimiento vegetal y la idea es mantener el depósito lleno. En este enfoque, el control de riego se basa en el contenido de agua o en las medidas de la tensión del agua del suelo. Los científicos usan dispersión de neutrones (*Neutron Scattering*, NS) (Shahrokhnia & Sepaskhah, 2016) o reflectometría de dominio temporal (*Time Domain Reflectometry*, TDR) (Kirkham, 2014) para la determinación absoluta del contenido de agua del suelo. Los métodos de NS miden un volumen limitado de la tierra, es costoso, emite radiación y no es aplicable para el uso diario por un agricultor. Varias compañías están comercializando sondas de suelo para la medición de la humedad del suelo. Algunas de estas sondas se basan en TDR. Las sondas de suelo, con excepción de las TDR, no miden el contenido de agua en suelo directamente y por lo tanto requieren una calibración. Las sondas de suelo se ven afectadas por la temperatura del suelo y la salinidad, además de medir solo un área limitada de volumen.

De otro lado, las tecnologías de comunicaciones inalámbricas han sido objeto de un rápido desarrollo en los últimos años. Se están desarrollando distintos tipos de tecnologías inalámbricas que van desde las que utilizan luz infrarroja para cortos alcances, las comunicaciones punto a punto, hasta la red de área personal inalámbrica (WPAN) de corto alcance. Las comunicaciones punto a multipunto, tales como Bluetooth y ZigBee, las redes de área local de múltiples saltos, la red de área local inalámbrica (WLAN), hasta los sistemas de telefonía celular de larga distancia, como GSM/GPRS y CDMA (Ojha, Misra & Raghuwanshi, 2015). El despliegue de sensores inalámbricos y redes de sensores en la agricultura y la industria alimentaria se encuentran todavía en la etapa inicial; las aplicaciones pueden ser clasificadas en cinco categorías: vigilancia del medio ambiente, la agricultura de precisión, control de procesos, automatización de edificios e instalaciones y los sistemas de trazabilidad. Los sensores inalámbricos se han utilizado en la agricultura de precisión para ayudar en la recolección de datos, la gestión del riego de precisión y el suministro de datos a los agricultores (Dener & Bostancioğlu, 2015; Ojha, Misra, & Raghuwanshi, 2015; Wang, Zhang & Wang, 2006). Sin embargo, son pocos los productos que están disponibles para el uso de un agricultor común o su uso requiere de fuertes inversiones que son inviables para muchos agricultores. En este trabajo, se presenta el desarrollo de un sistema de gestión inteligente de riego por goteo utilizando una red de sensores inalámbricos tipo *ZigBee*. El sistema está conformado por nodos terminales que se encargan de medir las condiciones ambientales del suelo haciendo uso de sensores de humedad, temperatura y conductividad eléctrica; nodos ruteadores encargados de actuar sobre las válvulas solenoides de riego y establecer una topología de comunicación tipo malla para encaminar las comunicaciones desde y hacia un nodo coordinador. El nodo coordinador envía los datos del campo hacia un servidor donde se instala un software de gestión y control predictivo que de acuerdo con los valores de las condiciones ambientales envía órdenes primero hacia un controlador que acciona la bomba principal y segundo hacia las válvulas solenoides utilizando la red de comunicaciones tipo malla establecido por el nodo coordinador y los nodos ruteadores. La gestión y control de las funcionalidades del servidor se pueden realizar de forma remota mediante cualquier dispositivo que esté conectado a Internet, incluso desde dispositivos móviles.

Este trabajo se ha organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se describen de forma genérica las redes de sensores inalámbricas, centrandó su descripción en las potencialidades que estas presentan para ser aplicadas en la gestión del riego. Luego, en la sección 3, se presentan los trabajos previos realizados con redes de sensores inalámbricas para la gestión del riego. Seguidamente, en la sección 4 presentamos nuestra propuesta, en la sección 5, los resultados de la evaluación del desempeño y finalmente, en la sección 6 damos a conocer las conclusiones.

Redes de sensores inalámbricos

Con el creciente desarrollo de los dispositivos inalámbricos de comunicación y de los sistemas electrónicos con bajo consumo de energía, es posible implementar una red inalámbrica que consta de nodos equipados con sensores y antenas; es decir, una red de sensores \cite{cit:akyildiz2002}. Los nodos de una red de sensores pueden trabajar de manera independiente y cooperativa.

Un nodo es un dispositivo con capacidad de censado, procesamiento y comunicación. Una red de sensores es una colección de nodos conectados entre sí, capaces de adquirir cierta información de su entorno, procesar dicha información y transmitirla a un centro de fusión de datos. Las redes de sensores inalámbricos se caracterizan por la transmisión de información mediante radiofrecuencia, gracias al tamaño reducido de los nodos, el bajo coste económico y su capacidad de procesamiento limitada (Akyildiz, Su, Sankarasubramaniam & Cayirci, 2002).

Son muchas las aplicaciones que se pueden implementar con las redes de sensores, solo por mencionar algunos ejemplos, el monitoreo de fenómenos meteorológicos, las erupciones volcánicas o los terremotos, la vigilancia y la seguridad (Xu, 2002). La mayoría de estas aplicaciones requieren un conocimiento previo de las posiciones de los nodos y de la propia red, en particular, en las aplicaciones de localización y seguimiento de otro elemento perteneciente a la red (Gustafsson, Gunnarsson & Lindgren, 2012). Por lo general, se suele asumir que los sensores se encuentran en posición conocida a priori. En la Figura 1 se muestra el esquema de una red de sensores con 7 nodos, cada nodo tiene una unidad de sensado y un sistema de comunicación. Se puede notar que el grafo de conectividad no siempre es completo, esto se debe a las limitaciones en potencia o la interferencia entre sensores (Gupta & Kumar, 2000).

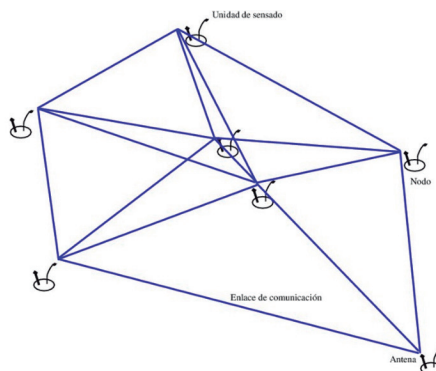


Figura 1.
Grafo de conectividad de una red inalámbrica de sensores

Las características más destacadas de las redes inalámbricas de sensores que, como una herramienta potencial, han permitido la automatización en el sector agrícola, son:

- *Inteligente capacidad de toma de decisiones:* Son de naturaleza multi-salto. En un área grande, esta característica mejora la eficiencia energética de la red general, y por lo tanto, aumenta la vida de la red. Al utilizar esta función, múltiples nodos sensores colaboran entre sí, y colectivamente toman la decisión final.
- *Configuración dinámica de su topología:* Para conservar la energía de la batería de nodos, un nodo sensor entra en modo dormido la mayor parte del tiempo; estos, en colaboración con técnicas de gestión de topología pueden tomar decisiones. Para maximizar la vida de la red, la topología de red está configurada de tal manera que el número mínimo de nodos permanecen en el modo activo.
- *La tolerancia a fallos:* Un reto común en el despliegue de las redes de sensores inalámbricos es que los nodos sensores son propensos a fallos. En tales circunstancias, el despliegue de nodos no planificado puede conducir a la partición de la red, y a su vez, el rendimiento global de la red se ve afectado. Sin embargo, en contra medida, los nodos sensores pueden auto-organizarse configurando dinámicamente la topología de red.
- *Sensibilidad al contexto:* En base a la información detectada sobre los parámetros físicos y ambientales, los nodos sensores pueden adquirir conocimientos sobre el contexto que los rodea. Las decisiones que toman dependen de su sensibilidad al contexto.
- *Escalabilidad:* En general, los protocolos de redes de sensores inalámbricos, están diseñados para ser implementados en cualquier red, independientemente de su tamaño y número de nodos. Esta característica, sin duda, amplía el potencial para numerosas aplicaciones.
- *Heterogeneidad de los nodos:* A menudo se supone que una red debe estar compuesta por dispositivos sensores homogéneos. Sin embargo, en muchos escenarios realistas, los dispositivos son heterogéneos con respecto al tratamiento y el cálculo de potencia, memoria, capacidad de detección, la unidad de transceptor y capacidad de movimiento.
- *Tolerancia frente a fallos de comunicación en condiciones ambientales duras:* Debido a la amplia gama de aplicaciones en entornos agrícolas abiertos, las comunicaciones

inalámbricas sufren los efectos de las condiciones ambientales adversas. La pila de protocolos incluye técnicas para soportar el efecto de fallos de comunicación en la red que surgen debido a los efectos ambientales.

- *Modo de funcionamiento autónomo:* Una característica importante de redes inalámbricas de sensores es su modo de funcionamiento autónomo, la capacidad de adaptación. En aplicaciones agrícolas, esta característica, ciertamente, desempeña un papel importante, permite un modo fácil y avanzado de operación.
- *Seguridad de la información:* Encaminan la información en bruto sobre los parámetros del campo en análisis. Para garantizar la seguridad de la información, proporcionan mecanismos de control de acceso y detección de anomalías para impedir que los usuarios no autenticados se integren a la red.

Redes de sensores inalámbricos en agricultura

Las redes de sensores inalámbricos se han utilizado para el riego automatizado en agricultura (ur-Rehman, Abbasi, Islam & Shaikh, 2014). Estas aplicaciones abordan el problema de la escasez de agua y la necesidad de una gestión adecuada del agua. Esto se logra mediante el suministro de agua solo para lugares donde se necesita, mientras que al mismo tiempo se controla la cantidad de agua consumida. Varios modelos, sistemas y metodologías para el riego se han desarrollado; todos los modelos analizados tienen similitud en el uso de elementos similares y la forma como se presenta la solución al problema de riego automático, que podemos resumirlos en dos tipos:

Riego automático de campo y sistema de control

Este sistema se refiere a la automatización del campo de riego. El modelo comprende un sistema de adquisición de datos, un bucle de control, una fuente de energía y una fuente de alimentación, un circuito de visualización, un circuito de alarma y un circuito de comunicación de datos. El sistema de recolección de datos está formado por sensores de humedad del suelo con un circuito de acondicionamiento de señal. El circuito de control está formado mediante un relé, una válvula electromagnética y un módulo de irrigación. El bucle de comunicación de datos está formado por circuitos transmisores-receptores tipo *ZigBee*, una red inalámbrica *ZigBee* y un ordenador. Un módulo central microordenador de un solo chip se comunica con el ordenador a través del coordinador de la red inalámbrica *ZigBee*. Según los autores, este modelo posee ventajas porque el módulo central del microordenador de un solo chip se utiliza para medir automáti-

camente la información de la humedad del suelo y el control de apertura y cierre del módulo de riego. También mencionan que poseen alta flexibilidad y precisión, y el mantenimiento se puede lograr convenientemente (Howell & Meron, 2007; Thomson & Threadgill, 1987).

Sistema de riego por goteo automático con redes de sensores inalámbricos

Se refieren a sistemas de riego por goteo automático con una red de sensores inalámbricos. El sistema comprende de una PC, nodos *ZigBee* de pasarela, nodos terminales, nodos routers, sensores y un mecanismo de ejecución. La PC está conectado con el nodo pasarela *ZigBee* a través de un cable de comunicación, los nodos terminales y el nodo enrutador están conectados al nodo pasarela *ZigBee* a través de una red inalámbrica. El nodo enrutador está conectado al mecanismo de ejecución, y los sensores están conectados a los nodos terminales. De acuerdo con la red inalámbrica de sensores el sistema de riego automático de goteo puede saber la condición del campo y controlar con precisión en tiempo real. Las mejoras que mencionan los autores se reflejan en la productividad del trabajo, la eficiencia económica, la reducción de pérdidas, la disminución en el coste laboral y las ventajas en el ahorro de agua.

Sistema propuesto

El sistema está conformado por nodos terminales que se encargan de medir las condiciones ambientales del suelo haciendo uso de sensores de humedad, temperatura y conductividad eléctrica, nodos routers encargados de actuar sobre las válvulas solenoides de riego y establecer una topología de comunicación tipo malla para encaminar las comunicaciones desde y hacia un nodo coordinador. El nodo coordinador envía los datos del campo hacia un servidor donde se instala un software de gestión y control predictivo que de acuerdo con los valores de las condiciones ambientales envía órdenes primero hacia un controlador que acciona la bomba principal y segundo hacia las válvulas solenoides utilizando la red de comunicaciones tipo malla establecido por el nodo coordinador y los nodos routers. Es posible realizar la gestión y control de las funcionalidades del servidor de forma remota mediante cualquier dispositivo que esté conectado a Internet, incluso desde dispositivos móviles.

Estación de bombeo

En estación de bombeo o cabecera de riego se ha instalado un Controlador Lógico Programable (PLC) para accionar la bomba principal, las bombas de nutrientes y desagüe,

los motores de los mezcladores de nutrientes, la lectura del caudal y nivel de pH del agua. El protocolo de comunicación con el servidor es MODBUS- 485. El servidor se comunica con el nodo coordinador por medio de una interface serial RS-485 con alimentación PoE. En la Figura 2, se muestran imágenes del PLC en instalación y el software de control y monitorio.



Figura 2.

Fotos del PLC y el servidor con el software de gestión y control de riego inteligente

Nodo terminal

El nodo terminal de alimentación con 3V DC (dos pilas AA), está cubierto por una caja estanca de policarbonato. Posee antena interna y/o externa dependiendo del modelo. El transceptor trabaja en la frecuencia de 2.4-GHz, compatible con el estándar IEEE 802.15.4. Posee un amplificador de potencia del tipo RFX2401. El área de cobertura es programable, llegando a los 1500m como máximo, con comunicación estable a 1300m y auto conexión a 1000m, cuenta con dos entradas para sensores de matriz granular tipo WATERMARK 200SS, un sensor de temperatura, un sensor de conductividad eléctrica y posibilidad de expansión para otro tipo de sensores. En la Figura 3 se muestra una imagen de la placa base del nodo terminal junto a sensores de matriz granular.

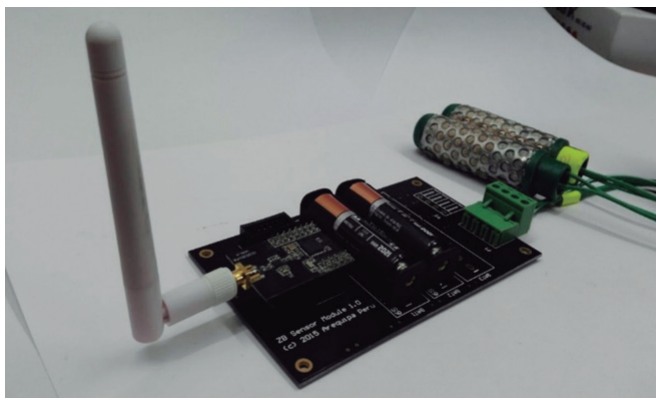


Figura 3.

Placa base del nodo terminal junto a sensores de matriz granular de la marca Irrometer.

Nodo ruteador

El nodo ruteador cuenta con alimentación fotovoltaica mediante un panel solar de 12V DC. Para almacenar energía, se utiliza una batería de 12V DC y 4AH. La placa base cuenta con circuito de gestión de carga y descarga de batería. La frecuencia de trabajo es de 2.4-GHz compatible con el estándar IEEE 802.15.4, posee un amplificador de potencia RXF2401. Puede cubrir áreas de 1500m, 1300m y 1000m para comunicación, comunicación estable y auto-comunicación, respectivamente. Cuenta con salida de dos válvulas solenoide de 12V DC. En la Figura 4, se muestra la placa base del nodo ruteador junto a los elementos que lo componen.



Figura 4.

Placa base del nodo ruteador, el panel solar junto a la batería y la válvula solenoide

Nodo coordinador y Software de gestión

El nodo coordinador se encarga de coordinar las comunicaciones en la red de sensores. También gestiona la información entre todos los nodos de la red y envía los datos hacia el servidor de aplicaciones. Al igual que el nodo terminal y ruteador, su trabajo es de 2.4-GHz, compatible con el estándar IEEE 802.15.4, posee un amplificador de potencia RXF2401 y puede cubrir áreas de 1500m, 1300m y 1000m para comunicación, comunicación estable y auto-comunicación, respectivamente. Se alimenta por PoE y se comunica con el servidor mediante RS-485 serial.

La operación del sistema de riego de goteo inteligente se realiza por medio de una pantalla de software que está instalada desde un computador ubicado en la cabecera de riego. Los elementos que componen la pantalla de operación se describen en la Figura 5.

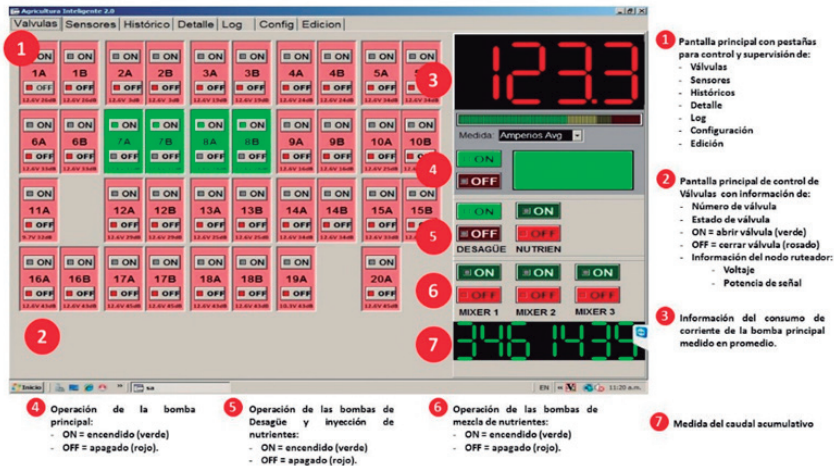


Figura 5.
Pantalla principal de operación del sistema de riego por goteo inteligente.

Evaluación del desempeño del sistema propuesto

Para la evaluación del desempeño del sistema propuesto, el prototipo se ha instalado en el fundo Santa Gabriela en el distrito de Santa Rita de Siguan de la provincia y departamento de Arequipa, en una extensión de 35.44 hectáreas de área de cultivo. El campo de cultivo cuenta con un sistema de riego por goteo presurizado y fertilización con una bomba principal de 50HP de potencia. Las cintas de riego son superficiales con una capacidad de descarga de 3.2 litros por hora. El riego está distribuido en 39 zonas de riego que en promedio cada zona tienen 0.7Has de extensión aproximadamente. En cada zona de riego se controla mediante una válvula reductora de presión de la marca DOROT. En la cabecera de riego, se cuenta con tres motores para la mezcla de nutrientes, una bomba para la inyección de nutrientes y otra bomba de desagüe.

Para evaluar el desempeño del sistema propuesto, realizamos comparaciones con los resultados obtenidos en una campaña anterior de quinua, donde, la cantidad de agua utilizada fue de 7000 metros cúbicos por hectárea. Las cantidades de unidades según componentes fue de: 321 unidades de Nitrógeno (N), 150 unidades de Fósforo (P), 182 unidades de Potasio (K), 23 unidades de Magnesio (Mg) y 21 unidades de Calcio (Ca), calculadas para la producción de 01 hectárea de quinua. Con estos insumos, se consiguió un rendimiento en la producción de 3500 kilogramos de quinua por hectárea.

Instalación del sistema de riego por goteo inteligente

Nodo terminal

Por cada válvula de una zona de riego se ha instalado un nodo terminal. Por cada nodo terminal se ha considerado dos sensores de matriz granular, cada uno a diferentes profundidades. Para el caso de la quinua, se han considerado las profundidades de 10cm y 20cm. Adicionalmente, en dos zonas de riego se han colocado un sensor de temperatura y otro de conductividad eléctrica. En total se instalaron 72 nodos terminales cada uno con dos sensores a profundidades distintas.

En la Figura 6 se presentan fotografías del nodo terminal instalado. Los sensores de matriz granular se instalaron a 5cm de la línea de riego y con una separación de 5cm entre ellos.



Figura 6.

Nodo terminal instalado en un campo de riego, muestras de la instalación de sensores

Nodo ruteador

Para cada una de las válvulas se ha colocado un nodo ruteador. Estos pueden actuar en una, dos y hasta cuatro válvulas. En este caso, cada nodo ruteador acciona dos válvulas por medio de una válvula solenoide de mando eléctrico. En la Figura 7 se muestra fotografías del nodo ruteador instalado. En todo el campo se han instalado 18 nodos ruteadores más tres adicionales que servirán para controlar el riego de plantaciones de palta, alelados al campo de prueba.



Figura 7.
Nodo ruteador instalado, muestras de la instalación de la válvula solenoide de acción eléctrica

Nodo coordinador

El nodo coordinador es quien gestiona las comunicaciones de la red malla y envía la información al sistema software de control y gestión del riego, para todo el campo solo hace falta un nodo coordinador. Se configuró el software para todo el campo y se colocó como umbral de riego a 20 centibares, es decir, en modo manual el sistema software presenta en color amarillo cuando el nivel está cercano a 20Cb, cambia a rojo cuando ha pasado este umbral y se mantiene en verde cuando está por debajo del mismo. En modo automático, mediante un algoritmo de control predictivo (control de puntos de cambio), el software genera una cola de puntos de riego y va abriendo válvulas en grupos de 4 válvulas. Para mantener la bomba principal en estado estable, el algoritmo de control de cambio se fija en que los niveles de consumo de corriente estén entre los rangos normales de consumo. En la Figura 8 se muestra imágenes del nodo coordinador instalado.

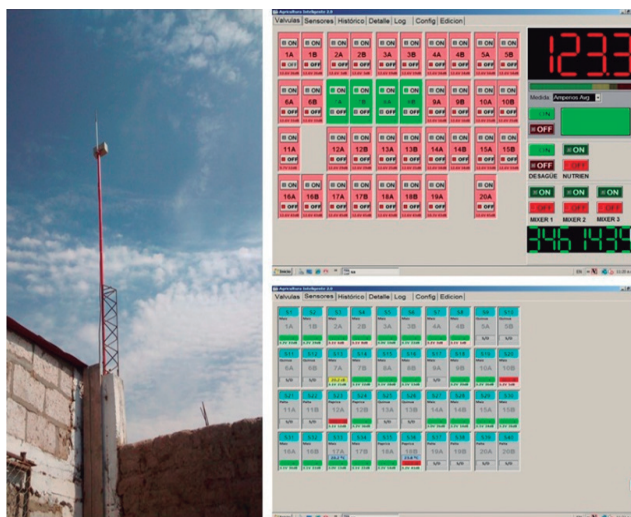


Figura 8.

Nodo coordinador instalado junto con la configuración del software de gestión de riego

Resultados

La supervisión de las condiciones ambientales del suelo, se puede realizar desde las pestañas de válvulas, sensores, histórico y detalles del software de gestión del sistema. En la pestaña de válvulas se podrá revisar el estado de estas, color rosado cuando están cerradas y verde cuando están abiertas. También se puede ver el nivel de voltaje de la batería del nodo ruteador y la potencia del dispositivo radio.

En la pestaña de sensores se indican los niveles de humedad, temperatura y conductividad eléctrica aparente del suelo. Para visualizar la evolución de los valores en el tiempo puede hacerlo de dos maneras: haciendo clic en la zona del sensor correspondiente o cambiando de pestaña a la de histórico.

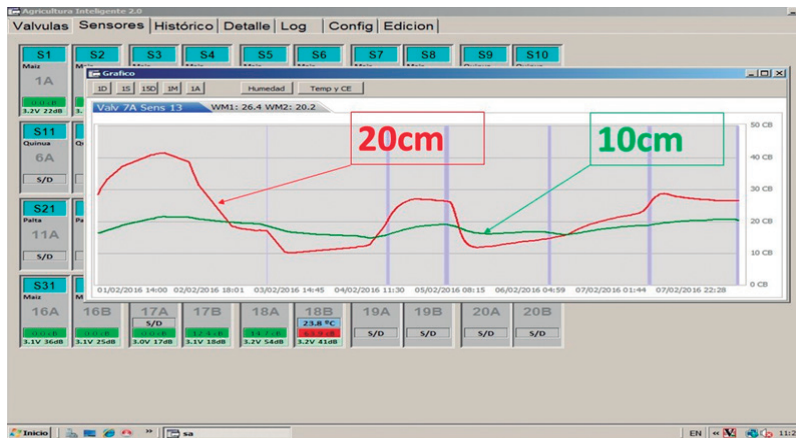


Figura 9.
Evolución de los niveles de humedad para dos profundidades distintas

Si hace clic sobre el indicador del sensor, se abre una pantalla emergente y la información que visualizará se muestra en la Figura 9, se pueden ver los datos por un día (1D), una semana (1S), quince días (15D), un mes (1M) o un año (1A). También, es posible cambiar de variable haciendo clic en las pestañas de humedad Temp y CE para ver las gráficas de humedad, conductividad eléctrica y/o temperatura, tal como se muestra en la Figura 10.

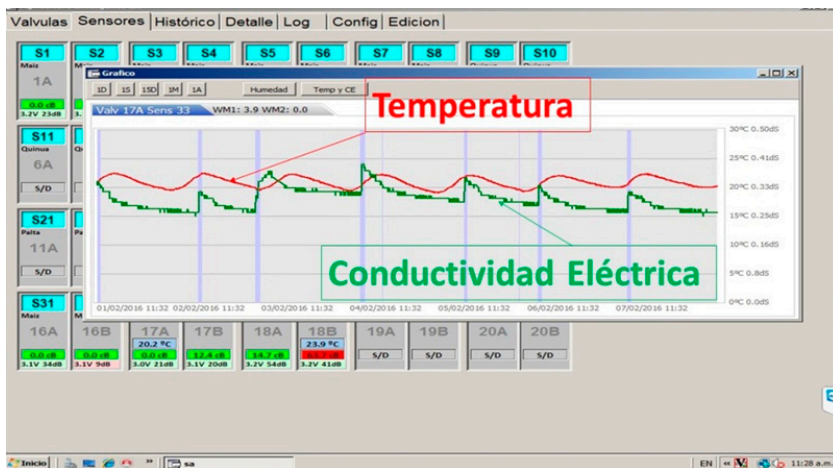


Figura 10.
Evolución de los niveles de conductividad eléctrica y temperatura.

En cada gráfica se puede visualizar la identificación de la válvula y los sensores que están ubicados en la zona de riego de dicha válvula. En la Figura 10, en líneas azules se nota

la acción automática del control predictivo con el algoritmo de detección de cambios en tiempo real, cada pulso de color azul indica que se ha ordenado abrir la válvula siguiendo la curva de color verde.

En la Tabla 1, se muestran los resultados de las comparaciones con un cultivo de quinua de una campaña anterior. La columna «Anterior» corresponde a los datos del Sistema de Riego por Goteo Tradicional (SRGGT) y la columna «Actual» a los datos con el Sistema de Riego por goteo Inteligente (SRINT). En las otras dos columnas, se muestran la diferencia entre las cifras anteriores y el rendimiento, respectivamente.

Tabla 1.

Tabla comparativa sobre el uso de agua, nutriente y producción para una campaña de quinua sin el sistema de riego por goteo inteligente y con el sistema de riego por goteo inteligente instalado

	Anterior (SRPGT)	Actual (SRINT)	Diferencia (CSRP GT-SRINT)	Rendimiento (%)
Agua (m3)	7000	5206,72	-1793,28	-25,62%
Unid. N	321	304	-17,00	-5,30%
Unid. P	150	135	-15,00	-10,00%
Unid. K	182	290	108,00	59,34%
Unid. Mg	23	34	11,00	47,83%
Unid. Ca	21	53	32,00	152,38%
Nutrientes	697	816	119	17%
Producción (Kg)	3500	3654,5	154,50	4,41%

De los resultados mostrados en la Tabla 1, se ha conseguido un ahorro de hasta 25,62% en el consumo de agua por hectárea. La producción por hectárea ha aumentado en 154.50 Kg, es decir en un 4.41%. Respecto al consumo de nutrientes, se puede notar que se ha utilizado menos unidades de Nitrógeno (-5.3%) y Fósforo (-10%). En el caso de K, Mg y Ca, estos han aumentado. Este incremento se debe a la temporada en que se ha realizado el cultivo, que fue entre agosto del 2015 y enero del 2016, fechas próximas y durante el mismo verano, donde las condiciones ambientales del terreno son más extremas. Sin embargo, solo en el caso de K, las unidades son altas, en los otros casos (Mg y Ca) las unidades utilizadas son pequeñas, siendo N y P los que más se han utilizado y con los que se han conseguido mejoras razonables.

Conclusiones

En el presente artículo, se ha descrito un nuevo sistema para la gestión del riego por goteo de manera inteligente utilizando una red inalámbrica de sensores tipo *ZigBee* aplicado en un cultivo de quinua. Se ha mostrado los diseños de los diferentes elementos que componen este nuevo sistema de riego, su instalación y funcionamiento.

Las prestaciones de este sistema a manera de piloto, se han evaluado en un campo de cultivo ubicado en el distrito de Santa Rita de Sigüas de la provincia de Arequipa, específicamente en el Fundo Santa Gabriela. Los resultados han mostrado una mejora en la productividad y un menor consumo de agua por cada hectárea de cultivo.

Durante la etapa de evaluación se han observado varias posibles mejoras que van desde la facilidad para la instalación, la pantalla de gestión y la forma de entregar reportes. Dichas mejoras se podrán implementar gracias a que este proyecto buscará desarrollar en el corto plazo, un producto comercial.

Referencias

- Adali, T. & Haykin, S. (2010). *Adaptive Signal Processing: Next Generation Solutions*. John Wiley & Sons.
- Akyildiz, I. F.; Su, W.; Sankarasubramaniam, Y. & Cayirci, E. (2002). A survey on sensor networks. *Communications Magazine IEEE*, 40, 102-114.
- Allen, R. (2005). PENMAN-MONTEITH EQUATION . En D. Hillel (Ed.), *Encyclopedia of Soils in the Environment* (pp. 180-188). Oxford: Elsevier.
- Alliance, Z. (2010). *ZigBee Alliance FAQ*. Obtenido el 12 de mayo del 2016 de: <http://www.zigbee.org/About/FAQ.aspx>
- Ballester, C.; Buesa, I.; Bonet, L. & Intrigliolo, D. S. (2014). Usefulness of stem dendrometers as continuous indicator of loquat trees water status. *Agricultural Water Management*, 142, 110-114.
- Barnett, R. H.; O'Cull, L. D.; Cox, S. A. & Cox, S. A. (2007). *Embedded C Programming And the Atmel AVR*. Delmar.
- Candy, J. V. (2009). *Bayesian Signal Processing: Classical, Modern and Particle Filtering Methods (Adaptive and Learning Systems for Signal Processing, Communications and Control Series)*. London: Wiley-Interscience.
- Dener, M. & Bostancioğlu, C. (2015). Smart Technologies with Wireless Sensor Networks. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, 1915-1921.
- Doucet, A.; Godsill, S. & Andrieu, C. (2000). On sequential Monte Carlo sampling methods for Bayesian filtering. *Statistics and Computing*, 10, 197-208.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2013). *FAO Statistical Yearbook 2013, World Food and Agriculture*. Obtenido el 22 de diciembre del 2015 de: <http://www.fao.org/docrep/018/i3107e/i3107e00.htm>
- Gislason, D. (2008). *Zigbee Wireless Networking*. Newton, MA, USA: Newnes.
- Gontia, N. K. & Tiwari, K. N. (2008). Development of crop water stress index of wheat crop for scheduling irrigation using infrared thermometry. *Agricultural Water Management*, 95, 1144-1152.
- Gordon, N. J.; Salmond, D. J. & Smith, A. F. (1993). Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation. *Radar and Signal Processing IEE Proceedings F*, 140, 107-113.
- Gupta, P. & Kumar, P. R. (2000). The capacity of wireless networks. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 46, 388-404.

- Gustafsson, F.; Gunnarsson, F. & Lindgren, D. (2012). Sensor models and localization algorithms for sensor networks based on received signal strength. *EURASIP J. Wireless Comm. and Networking*, 2012, 16.
- Gustafsson, F.; Gunnarsson, F.; Bergman, N.; Forssell, U.; Jansson, J.; Karlsson, R. & Nordlund, P. J. (2002). Particle filters for positioning, navigation, and tracking. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 50, 425-437.
- Hedlund, S. & Johansson, M. (1999). *PWLTLOOL: A Matlab toolbox for analysis of Piecewise Linear Systems*.
- Howell, T. A. & Meron, M. (2007). Irrigation scheduling. En J. E. Freddie R. Lamm, & F. S. Nakayama (Eds.). *Microirrigation for Crop Production* (Vol. 13, pp. 61-130). Elsevier.
- James, L. G. (1987). *Principles of Farm Irrigation System Design*. London: Wiley.
- Jang, K. W. (2007). Location Tracking for Wireless Sensor Networks. En Y. Koucheryav, J. Harju & A. Sayenko (Eds.). *Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networking* (Vol. 4712, pp. 306-315). Berlin / Heidelberg: Springer.
- Kirkham, M. B. (2014). Time Domain Reflectometry. En M. B. Kirkham (Ed.), *Principles of Soil and Plant Water Relations (2nd Edition)* (pp. 103-122). Boston: Academic Press.
- Munoz, D.; Lara, F. B.; Vargas, C. & Enriquez-Caldera, R. (2009). *Position Location Techniques and Applications*. Academic Press.
- Ojha, T.; Misra, S. & Raghuwanshi, N. S. (2015). Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118, 66-84.
- Powell, D. B. & Coggins, S. J. (1985). A portable scholander-type pressure chamber for small-leaved cereals. *Agricultural and Forest Meteorology*, 34, 277-284.
- Shah, P.; Shaikh, T. H.; Ghan, K. P. & Shilaskar, S. N. (2008). Power Management Using ZigBee Wireless Sensor Network. *Proceedings of the 2008 First International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology* (pp. 242-245). Washington: IEEE Computer Society.
- Shahrokhnia, M. H. & Sepaskhah, A. R. (2016). Effects of irrigation strategies, planting methods and nitrogen fertilization on yield, water and nitrogen efficiencies of safflower. *Agricultural Water Management*, 172, 18-30.

- Singh, A. (2014). Conjunctive use of water resources for sustainable irrigated agriculture. *Journal of Hydrology*, 519, Part B, 1688-1697.
- Thomson, S. J. & Threadgill, E. D. (1987). Microcomputer control for soil moisture-based scheduling center pivot irrigation systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 1, 321-338.
- United Nations, 2. (2015). *World Population Prospects: 2015 Revision Population*. Obtenido de <http://www.un.org.strauss.uc3m.es:8080/en/development/desa/population/>
- ur-Rehman, A.; Abbasi, A. Z.; Islam, N. & Shaikh, Z. A. (2014). A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Computer Standards & Interfaces*, 36, 263-270.
- Wang, N.; Zhang, N. & Wang, M. (2006). Wireless sensors in agriculture and food industry—Recent development and future perspective. *Computers and Electronics in Agriculture*, 50, 1-14.
- Xu, N. (2002). A Survey of Sensor Network Applications. *IEEE Communications Magazine*, 40, 1-9.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por fondos de INNOVATE Perú con el proyecto No. 335-PNICP-PITEI-2014. La Universidad Católica San Pablo y la empresa Santa Gabriela S.A.C., han otorgado aportes no monetarios para el desarrollo de este proyecto.