

Development of a system for intelligent irrigation for the automation of water use

Edwin Jose Aranibar Pumacota, Ingeniería de Sistemas¹, Edgar Acuña Melo, Ingeniería de Sistemas¹ and Edwar Andres Velarde Allazo, MSc. Ingeniería Eléctrica y Telecomunicaciones²

¹Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, earanibarp@unsa.edu.pe, eacunam@unsa.edu.pe

²Universidad Tecnológica del Perú, Perú, evelarde@utp.edu.pe

Abstract– In the present investigation, a system for intelligent irrigation based on the Internet of Things (IoT) was developed, achieving an interconnection of sensors, actuators and software, in addition to this, we worked with 3 study areas, which were the following: "Agronomy", the state of the art was carried out on the characterization of the Crimson Giant radish, in this characterization the soil humidity was found to be between 60% and 65%; "Computational electronics", where the study was made on microcontrollers, sensors, actuators, and wireless communication, thanks to this a kit was built, which allowed humidity control, activation / deactivation of actuators (pump, solenoid valves) and data sending wirelessly. Finally, "Software", thanks to the scalable system, allowed crop management, configuration and humidity control, and real-time monitoring.

Keywords: IoT, smart irrigation, microcontrollers

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Desarrollo de un sistema para el riego inteligente para la automatización del uso del agua

Edwin Jose Aranibar Pumacota, Ingeniería de Sistemas¹, Edgar Acuña Melo, Ingeniería de Sistemas¹ and Edwar Andres Velarde Allazo, MSc. Ingeniería Eléctrica y Telecomunicaciones²

¹Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, earanibar@unsa.edu.pe, eacunam@unsa.edu.pe

²Universidad Tecnológica del Perú, Perú, evelarde@utp.edu.pe

Resumen– En la presente investigación se desarrolló un sistema para el riego inteligente basado en Internet de las Cosas (IoT) logrando una interconexión de sensores, actuadores y software, además de ello, se trabajó con 3 áreas de estudio, que fueron las siguientes: “Agronomía”, se realizó el estado del arte sobre la caracterización del rabanito Crimson Giant, en esta caracterización se evidenció la humedad de suelo se encuentra entre 60% y 65%; “Electrónica computacional”, donde se hizo el estudio sobre microcontroladores, sensores, actuadores, y comunicación inalámbrica, gracias a esto se construyó un kit, que permitió el control de humedades, activación/desactivación de actuadores (bomba, electroválvulas) y envío de datos de forma inalámbrica. Finalmente, “Software”, gracias al sistema escalable permitió la gestión de cultivos, configurar y controlar humedades, monitorización en tiempo real.

Palabras clave: IoT, riego inteligente, microcontroladores.

I. INTRODUCCIÓN

La mala gestión del agua representa un problema a nivel mundial y gracias al acelerado crecimiento de la población este recurso toma un papel importante en la agricultura, a mayor crecimiento poblacional se requiere una mayor producción de alimentos.

Mientras que en países más desarrollados ya se implementan tecnologías que acompañan al agricultor con el desarrollo de sus cultivos, en países tercermundistas es muy poco común ver este tipo de tecnologías. La agricultura tradicional se basa en el conocimiento empírico y la experiencia del agricultor, aplican agua y uso excesivo de fertilizantes, que en ocasiones producen problemas como: salificación de tierra, lavado de nutrientes, contaminación del suelo y pérdida de productividad [1][2]. De la misma forma, una de las principales características de la agricultura tradicional es que en ocasiones es desarrollada en espacios reducidos de tierra, que usualmente no es adecuada para los cultivos, hasta en ocasiones tiene aguas residuales y heces fecales [3].

Algunos datos estadísticos indican que la agricultura en el Perú desperdicia el aproximadamente el 40% de agua por el uso de sistemas de riego tradicionales acompañándolos por una mala gestión del riego [4] [5], además de ello, en algunos lugares la escasez del agua es cada vez mayor. Por estos motivos se desarrolló un sistema para el riego inteligente, que gracias a la ayuda de IoT se interconectó sensores, actuadores y componentes mecánicos que fueron controlados desde una página web, y gracias al sistema de riego por goteo se distribuyó el agua de manera eficiente. Para comparar el uso eficiente del agua, en un laboratorio se puso en marcha el sistema inteligente y se automatizó el riego tradicional, como cultivo de prueba se

utilizó el Rabanito Crimson Giant por permitir su siembra en cualquier temporada del año y ser de rápido crecimiento.

II. SUSTENTO TEÓRICO

Hoy en día en los sistemas de control industrial, es esencial poder acceder a los datos recopilados por los sensores desde cualquier lugar del mundo y poder ajustar sus parámetros según las necesidades específicas del cliente o producto. La implementación de tecnologías innovadoras como la Internet de las cosas (IoT) ha cambiado la forma en que se trabaja en la industria. El uso de la IoT es muy diverso y abarca múltiples campos, el presente estudio se enfoca en el campo de aplicación de la agricultura inteligente.

A. Tecnologías de Información y Comunicación (TIC)

Son un conjunto de tecnologías que sirven para gestionar y transformar información y con uso de programas y computadoras se puede insertar, actualizar, buscar, eliminar y almacenar esa información [6].

La aplicación de Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) en la agricultura se refiere al uso de tecnologías digitales y electrónicas para mejorar la eficiencia, productividad y sostenibilidad del sector agrícola. Estas tecnologías pueden incluir sistemas de monitoreo remoto, sensores inteligentes, drones, sistemas de información geográfica y herramientas de análisis de datos para tomar decisiones informadas en tiempo real sobre el manejo de los cultivos y recursos naturales. La aplicación de TIC en la agricultura también puede ayudar a reducir costos, minimizar el impacto ambiental y mejorar la calidad y cantidad de los productos agrícolas [7].

B. Internet de las Cosas

Internet de las cosas (IoT) o “Internet of Things”, es la interconexión de dispositivos a internet los cuales interactúan en el mundo digital y en el mundo físico, pueden procesar, enviar y coleccionar información de su entorno para así brindar servicios con valor añadido a los usuarios [8].

La conectividad es un aspecto crucial en la vida moderna de las personas. Gracias a la Internet, se han reducido las distancias y se ha mejorado la velocidad y la disponibilidad de acceso a la información. Como resultado, ha surgido un nuevo concepto denominado “Internet de las cosas” (IoT), que se basa en cuatro pilares fundamentales. En primer lugar, están las personas, que son el elemento principal de la conexión. En segundo lugar, están los procesos, que implican la transmisión

de información entre la persona y el dispositivo. En tercer lugar, están los datos, que representan el conocimiento generado a partir de los procesos. Por último, están los objetos, que son los dispositivos físicos que se conectan a Internet y entre sí [9].

C. Sensores

Son dispositivos eléctricos que transforman magnitudes físicas (humedad del suelo, humedad relativa, temperatura, luz, etc.) en valores medibles [10]. Los datos obtenidos a través de los sensores se procesan y analizan para obtener información útil sobre las condiciones de los cultivos y su entorno, lo que puede ayudar a los agricultores a tomar decisiones informadas sobre la gestión del cultivo y la aplicación de insumos agrícolas. Además, los sensores también se utilizan para detectar enfermedades en los cultivos y para controlar la calidad y cantidad de los productos agrícolas. La aplicación de sensores en la agricultura puede mejorar la eficiencia y la sostenibilidad del sector, reducir costos y mejorar la calidad de los cultivos y productos [11][12].

-) Sensor de humedad de suelo: Mide la constante dieléctrica del suelo, transmitiendo impulsos eléctricos que están relacionados con el nivel de humedad del suelo [13] para que puedan ser interpretados mediante un proceso de calibración.
-) Sensor de temperatura y humedad relativa: Mide la humedad y la temperatura ambiental, cuenta con un sensor térmico que transforma la diferencia de potencial en una señal que puede ser medida [14].
-) Sensor de flujo de agua: Mide la cantidad de agua que fluye a través de una tubería [15].

D. Actuadores

Los actuadores son componentes esenciales en la automatización de procesos agrícolas, ya que permiten controlar y modificar las variables ambientales de un sistema agrícola, como la temperatura, la humedad y la luz. Los actuadores se utilizan en combinación con sensores para realizar tareas automatizadas en la agricultura, como la irrigación, la ventilación y la iluminación, entre otras. Los actuadores pueden ser de diferentes tipos, como motores eléctricos, válvulas solenoides, bombas y sistemas de riego automatizados [16].

-) Módulo relé: Permite controlar componentes de alto voltaje mediante una señal pequeña como bombas de agua (220V) [17].
-) Módulo MOSFET: Permite manejar el encendido/apagado de válvulas solenoides, motores DC, celdas Peltier, luces LED, etc. [17].

E. Riego

Es una forma artificial de aplicar agua en la zona de la raíz de las plantas cultivadas para que la aprovechen al máximo [18]. Un adecuado control del agua puede mejorar la calidad de los cultivos al mantener niveles adecuados de humedad en el

suelo y evitar la acumulación de sales tóxicas [19]. Dentro de las formas de riego se encuentran:

-) Por superficie.
-) Tendido.
-) Por surcos.
-) Por melgas.
-) Por aspersión.
-) Por goteo.

F. Sistema de riego inteligente

La agricultura inteligente es un dominio bien establecido y existen numerosas ventajas de combinar la tecnología con la experiencia de los agricultores, como: mejora de la salud de los cultivos [20], mejor salud y seguimiento de los animales de las granjas avícolas [21], gestión del agua [22] [23], etc.

Los sistemas de riego inteligentes estiman y miden la disminución de la humedad de la planta existente para operar un sistema de riego, restaurando el agua según sea necesario y minimizando el uso excesivo de agua [24].

Un sistema de riego inteligente es un sistema de riego automatizado que utiliza sensores y tecnología para controlar y optimizar el uso del agua en la agricultura. Según [25], los sistemas de riego inteligentes pueden monitorear las condiciones del suelo, la humedad y la temperatura del aire, así como la evapotranspiración de las plantas, y ajustar automáticamente el suministro de agua para maximizar la eficiencia y reducir el desperdicio de agua.

III. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este proyecto se inició con el levantamiento de información sobre la caracterización del cultivo *Rabanito Crimson Giant*, arquitecturas de sistemas de riego utilizando sensores y actuadores, diseño y despliegue de aplicaciones web con comunicación con microcontroladores y desarrollo de sistemas inteligentes.

Dentro de las principales áreas de estudio, en el hardware se evalúa y valida el funcionamiento de cada componente por separado, por ejemplo, las lecturas que realiza el sensor de humedad del suelo junto con el microcontrolador, o la salida de agua registrada por el sensor de flujo. Luego de la evaluación y validación de cada componente se procede con la integración de todos ellos creando el *kit*.

IV. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Se utilizó una investigación experimental, ya que no solo se colecta datos ni tampoco se basa en la observación de fenómenos, sino que permite la manipulación deliberada de una de las variables que impactan en el desarrollo del experimento [26].

Con la variable cuantitativa experimental se realizó diferentes experimentos manteniendo distintos porcentajes de humedades de suelo que permitieron validar el control de la humedad de suelo desde una página web.

La población con la que se realizó el estudio de caso está determinada por todos los cultivos de tipo tubérculo en los que se pueda aplicar un sistema de riego por goteo.

Para interés del proyecto se tomó 4 procesos de siembra con el mismo cultivo durante el mismo periodo, se actúa sobre una variable en específico, los 2 primeros cultivos utilizan el sistema inteligente para el riego propuesto (ri) y los 2 últimos un riego tradicional (rt), distribuidas en la siguiente tabla:

Maceta	Humedad del suelo (%)
E001 (ri)	60 – 65
E002 (ri)	65 – 70
E003 (rt)	60 – 100
E004 (rt)	50 – 100

Tabla 1 Distribución de la muestra.
Fuente: Elaboración propia.

Y para obtener datos climatológicos que impactan sobre el cultivo se procedió con el levantamiento de información de diversas fuentes (revistas, libros, tesis y estudios relacionados con el tema), adicionalmente se recolectó datos por medio de sensores.

V. DESARROLLO

A. Arquitectura del sistema

Se trabajó con el microcontrolador ESP8266 ya que permite conectarse a Internet, y por tanto, permite enviar y recibir información a través de peticiones HTTP. Se encarga de abrir/cerrar las electroválvulas y de recolectar toda la información de los sensores.

Cada cierto tiempo el microcontrolador realiza peticiones hacia el servidor, por ejemplo: obtener la información sobre los niveles de humedad de suelo necesarios para el control de riego; o realizar peticiones para activar o desactivar directamente las electroválvulas.

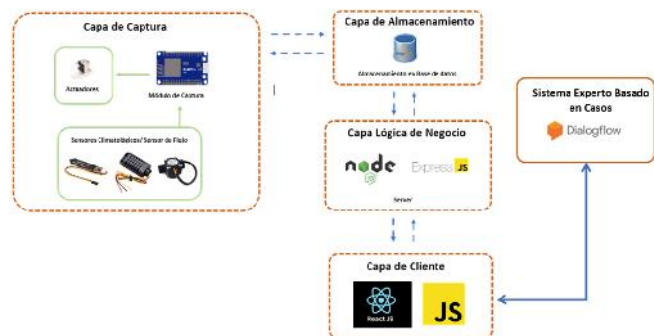


Fig. 1 Arquitectura del sistema.
Fuente: Elaboración Propia.

B. Conexión de sensores y actuadores

A continuación, se muestra la conexión de los diferentes componentes (sensores y actuadores).

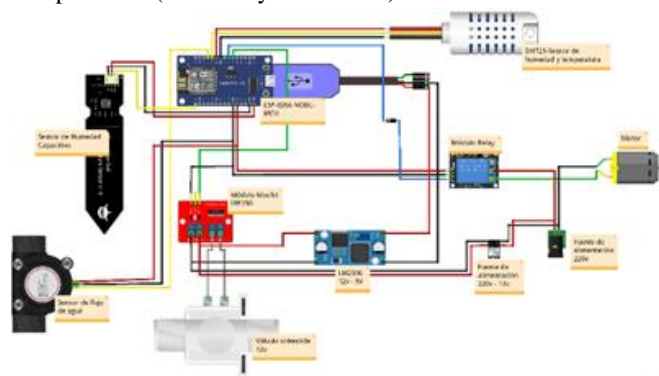


Fig. 2 Esquema de conexión de sensores y actuadores.
Fuente: Elaboración propia.

El sensor de humedad del suelo, temperatura y humedad relativa, y de flujo de agua se conectan a pines GND, VCC y entradas de datos correspondiente del microcontrolador ESP8266.

El módulo relé se conecta en los pines GND, VCC y entrada de datos correspondiente de ESP8266 mediante un diodo. A su vez, se conecta a una salida la cual se conecta a un motor de agua con una potencia de 220V.

La salida de las electroválvulas se conecta al ESP8266 mediante un módulo Mosfet y a la entrada de potencia de 12VDC.

El módulo Mosfet se conecta al ESP8266, por último, a la entrada de potencia 24VDC de la fuente de alimentación.

Adicionalmente, el convertidor de voltaje se conecta al módulo Mosfet y transforma 24 VDC a 5 VDC necesarios para el funcionamiento del microcontrolador, luego de esto se conecta a GND y VIN del ESP8266.

C. Conexión del microcontrolador y servidor

La comunicación entre el ESP8266 y el servidor se da mediante el monitor serial del IDE de Arduino. Para la transmisión y petición de información necesaria, como es el almacenamiento de los datos sensados o la petición de los valores de humedades de suelo.

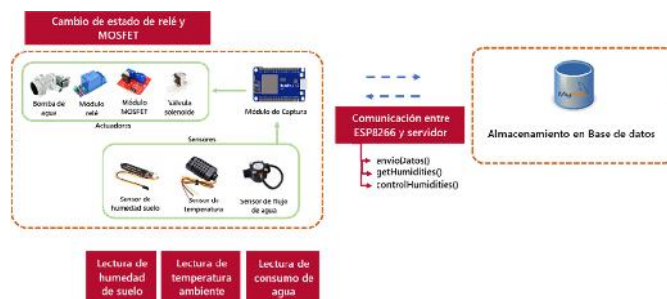


Fig. 3 Conexión del microcontrolador y servidor.
Fuente: Elaboración Propia.

Para la transmisión de los datos sensados hacia el servidor se utilizó el método de petición HTTP POST.

```
void EnvioDatos(int codsenso, float temp, float hum, int porcentaje, float litros){
  if (WiFi.status() == WL_CONNECTED){
    HTTPClient http;
    String datos_a_enviar = "CodSensor=" + String(codsenso) + "&Temperatura=" + String(temp) +
      "&HumedadAmbiente=" + String(hum) + "&HumedadSuelo=" + String(porcentaje)+
      "&FlujoAgua=" + String(litros);
    http.begin(Client, "http://192.168.0.101/dht22.php");
    http.addHeader("Content-type", "application/x-www-form-urlencoded");

    int codigo_respuesta = http.POST(datos_a_enviar);

    if (codigo_respuesta > 0){
      Serial.println("Codigo HTTP: " + String(codigo_respuesta));
      if (codigo_respuesta == 200){
        String cuerpo_respuesta = http.getString();
        Serial.println("El servidor respondió: ");
        Serial.println(cuerpo_respuesta);
      }
    } else {
      Serial.print("Error enviado POST, código: ");
      Serial.println(codigo_respuesta);
    }

    http.end();
  } else {
    Serial.println("Error en la conexión WiFi");
  }
}
```

Fig. 4 Configuración del ESP8266 para el envío de datos.
Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 6 y Fig. 6 se observa la petición de datos de humedades mediante el método de petición HTTP GET. Aquí se empleó dos funciones para poder obtener la humedad máxima, y la humedad mínima.

```
String gethumedadMax() {
  if (client.connect(server, 80)) {
    client.print("GET /gethumMax.php");
    client.println(" HTTP/1.0");
    client.println("Host: ");
    client.print(server);
    client.println("Connection: close");
    client.println();
  }
  else {
    Serial.println("Conexión fallida");
    Serial.println("Desconectando");
    client.stop();
  }
  delay(100);

  while (client.available()) {
    char c = client.read();
    codigo += c;
    fin = true;
  }
  if (fin) {
    int longitud = codigo.length();
    int posicion = codigo.indexOf("valor=");
    humedadMax = "";
    for (int i = posicion + 6; i < longitud; i++) {
      if (codigo[i] == ';') i = longitud;
      else humedadMax += codigo[i];
    }
    fin = false;
  }
  client.stop();
  codigo = "";
  return humedadMax;
}
```

Fig. 6 Configuración del ESP8266 para la petición de datos (humedad máxima).
Fuente: Elaboración propia.

```
String gethumedadMin() {
  if (client2.connect(server, 80)) {
    client2.print("GET /gethumMin.php");
    client2.println(" HTTP/1.0");
    client2.println("Host: ");
    client2.print(server);
    client2.println("Connection: close");
    client2.println();
  }
  else {
    Serial.println("Conexión fallida");
    Serial.println("Desconectando");
    client2.stop();
  }
  delay(100);

  while (client2.available()) {
    char c = client2.read();
    codigo += c;
    fin = true;
  }
  if (fin) {
    int longitud = codigo.length();
    int posicion = codigo.indexOf("valor=");
    humedadMin = "";
    for (int i = posicion + 6; i < longitud; i++) {
      if (codigo[i] == ';') i = longitud;
      else humedadMin += codigo[i];
    }
    fin = false;
  }
  client2.stop();
  codigo = "";
  return humedadMin;
}
```

Fig. 5 Configuración del ESP8266 para la petición de datos (humedad mínima).
Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidos estos valores, desde la página web, se puede encender/apagar las electroválvulas y el módulo relé. Este control se realiza mediante HIGH o LOW (Fig. 7). Esta función verifica que la humedad del suelo se encuentre entre el rango especificado por el usuario, y para esto recibe dos valores: humedadMax y humedadMin, si la humedad actual se encuentra entre el rango establecido por el usuario o excede ese rango entonces se desactiva la electroválvula y el motor. De lo contrario, si la humedad actual es menor que el rango establecido por el usuario entonces se enciende el motor y la electroválvula. A su vez, esta función también se encarga de ir contabilizando la cantidad de agua usada por cada maceta.

```
if (porcentaje >= humedadMin.toInt() && porcentaje <= humedadMax.toInt())
{
  digitalWrite(solenoidPin, LOW);
  digitalWrite(relayPin, HIGH);
  litros = obtenerFlujoAgua();
}
else
{
  if (porcentaje > humedadMax.toInt())
  {
    digitalWrite(solenoidPin, LOW);
    digitalWrite(relayPin, HIGH);
    litros = obtenerFlujoAgua();
  }
  else
  {
    digitalWrite(solenoidPin, HIGH);
    digitalWrite(relayPin, LOW);
    litros = obtenerFlujoAgua();
  }
}
```

Fig. 7 Cambio de estado de válvula solenoide y módulo relé.
Fuente: Elaboración propia.

D. Implementación del sistema

El sistema propuesto cuenta con 4 macetas con las mismas características de suelo, y con un nivel de humedad inicial del 60% al 80%.

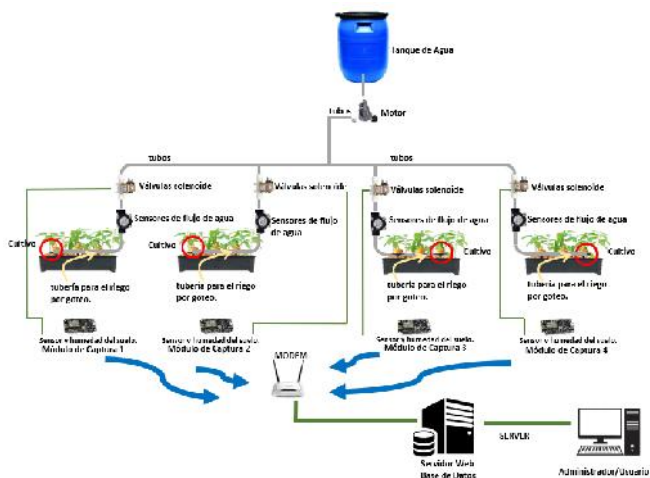


Fig. 8 Implementación del sistema.
Fuente: [27].

Se plantó el rabanito en dos surcos a 6 centímetros de distancia entre plantas y 2 centímetros de profundidad, cada maceta cuenta con un kit y mediante la página web se controla el nivel de humedad de suelo y la activación/desactivación de las electroválvulas, además se puede visualizar la humedad del suelo y temperatura ambiente en tiempo real de cada maceta.

Las 2 primeras macetas fueron controladas por el sistema inteligente para el riego. El sistema inteligente asiste con los valores mínimos y máximos de la humedad del suelo ideal para este cultivo y otros 10 cultivos tipo tubérculo. En la primera maceta se aceptó la sugerencia del sistema inteligente, en la segunda maceta se ingresó otro rango de humedad (65% - 70%), y en las últimas 2 macetas se simuló un riego tradicional, en donde se riega por inundación cada vez que la humedad baja del límite establecido.

Para poder replicar el riego tradicional en las 2 últimas macetas se tuvo que realizar pruebas con diferentes niveles de humedad de suelo para que aproximadamente cada 6 o 7 días la maceta necesite de agua, como resultado de estas pruebas la configuración de humedad para el maceta 3 fue entre 60% y 100% y para el maceta 4 fue entre 50% y 100%. Se controló un nivel de humedad hasta 100% porque el riego tradicional inunda el terreno del cultivo cada vez que la tierra se encuentre seca. Una vez que el sistema riega, no lo vuelve a hacer hasta que la humedad de suelo se encuentre por debajo del mínimo configurado.



Fig. 9 Configuración de la humedad de suelo para cada maceta.
Fuente: Elaboración propia.

E. Implementación del sistema experto basado en casos

Se desarrolló un sistema experto basado en casos desplegado sobre una página web en la cual una vez que se seleccione un cultivo el módulo de recuperación extraerá de la base de casos el caso o los casos más parecidos a la selección. El caso está formado por distintos atributos que otorgan una descripción del problema y una solución para el caso, para poder ejecutar la tarea de recuperación es necesario tener un algoritmo y un nivel de prioridad que serán usados para obtener un conjunto de casos similares.

1. **Base de casos:** Para la construcción de la base de casos se utilizó el Framework Dialogflow Essentials, donde se registran los “casos” las cuales pueden estar representadas por una tabla o un objeto JSON. La Fig. 10, representa la estructura de una base de casos del rabanito en formato JSON, donde el objeto userSays son los diferentes “casos” que representan una pieza contextualizada de conocimiento, y el objeto responses, las diferentes repuestas o posibles soluciones para cada “caso” ingresado.

```

{
  "id": "ba185f2c-6232-4a99-8902-d2ce28eccc8f",
  "name": "Rabano",
  "responses": [
    ...
  ],
  "rootParentId": null,
  "translations": [],
  "userSays": [
    {
      "intentName": false,
      "data": {
        ...
      },
      "transl": 0,
      "id": "1d6d78c2-4211-4432-b3dd-3edc117e2a96",
      "update": null
    }
  ]
}

```

Fig. 10 Base de casos en formato JSON.
Fuente: Elaboración propia.

Se desarrolló una base de casos acerca de humedades de suelo ideales para 10 cultivos de tipo tubérculo, mejores épocas de siembra y la forma ideal de siembra, este Framework exporta la base de casos en objetos JSON, los cuales son agregados dentro de la página web.

2. **Módulo de recuperación:** Este módulo se encarga de extraer los “casos” de la base de casos más semejantes por las acciones de los usuarios dentro de la página web. Para escoger una medida de semejanza entre los casos se desarrolló un algoritmo de clasificación de complejidad $O(n \log n)$, primero se inició con la desestructuración de la base de casos individualizando cada caso en un objeto JSON como se muestra en la Fig. 11, haciendo la recuperación de casos más rápida al importar la base de casos correspondiente.

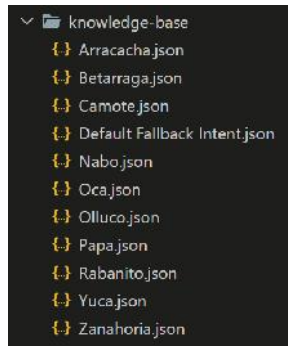


Fig. 11 Base de casos.
Fuente: Elaboración propia.

Teniendo la base de casos, el algoritmo de clasificación comienza a recuperar uno o más casos similares a la consulta realizada por el usuario, en la Fig. 12 se visualiza el algoritmo de clasificación donde se observa la obtención de la base de casos y el inicio de la recuperación de los casos similares.

```

49 (done) {
50   state.USPlanta = data.US
51   import('.../services/knowledge-base/${data.Nombre}.json')
52   .then((resp) => {
53     resp.userSays.forEach(item => {
54       item.data.forEach(item => {
55         if ((item.text === data.Nombre) || item.text.includes(data.Nombre) && item.priority === 1) {
56           Swal({
57             title: 'El asistente dice...',
58             text: resp.responses[0].messages[0].speech[0],
59             icon: 'info',
60           }).then((result) => {
61             if (result) {
62               const humedadMinimaText = document.getElementById("HumedadMinima");
63               const humedadMaximaText = document.getElementById("HumedadMaxima");
64               const msj = resp.responses[0].messages[0].speech[0];
65               const primerIndice = msj.indexOf("%");
66               const ultimoIndice = msj.lastIndexOf("%");
67               state.HumedadMinima = msj.substring(primerIndice + 2, primerIndice);
68               state.HumedadMaxima = msj.substring(ultimoIndice - 2, ultimoIndice);
69               humedadMinimaText.value = msj.substring(primerIndice + 2, primerIndice);
70               humedadMaximaText.value = msj.substring(ultimoIndice - 2, ultimoIndice);
71             }
72           })
73         }
74       })
75     })
76   })
77 }

```

Fig. 12 Algoritmo de recuperación.
Fuente: Elaboración propia.

3. **Módulo de adaptación:** Gracias a este módulo se logra la transformación de un problema previo en la solución del problema nuevo a resolver, generalmente las consultas que se presentan no son idénticas a los casos anteriores almacenados en la base de casos por este motivo se necesita adaptar una solución existente para que se ajuste al nuevo caso. Si bien es cierto que el algoritmo de clasificación recupera más de un caso, podemos adaptar la solución del nuevo caso mediante el atributo de prioridad de todos los casos recuperados, en la Fig. 13 se muestra cómo el sistema brinda la solución del caso más cercano a la consulta realizada por el usuario, muestra información sobre humedades ideales para el tipo de cultivo seleccionado, además muestra la época de siembra y la forma ideal de siembra.



Fig. 13 Respuesta del sistema experto basado en casos.
Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Se realizaron registros de la humedad del suelo durante todo el periodo de crecimiento del cultivo, en los siguientes gráficos se observa los diferentes comportamientos de humedad para cada contenedor, además se puede visualizar el control del sistema para mantener la humedad del suelo en los rangos establecidos.

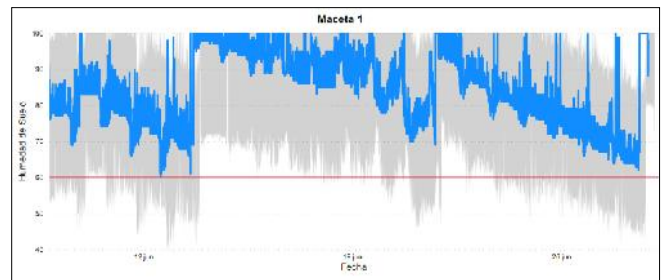


Fig. 14 Registro de humedad del suelo de la primera maceta.
Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 14 se observa el cambio constante de humedad del suelo principalmente en los días más soleados, además se puede apreciar que la humedad del suelo no baja del 60% siendo el mínimo establecido por el sistema y al llegar a ese nivel la humedad aumenta. También se puede visualizar que en ocasiones la humedad sobrepasa el máximo establecido, esto sucede porque el sensor de humedad de suelo utilizado es muy sensible.

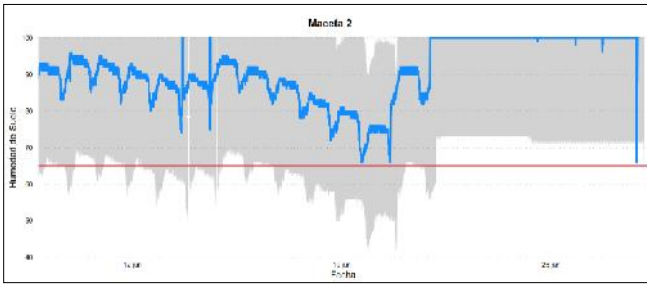


Fig. 15 Registro de humedad del suelo de la segunda maceta.
Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 15, la humedad de suelo sigue el mismo comportamiento de descenso por días más soleados, aunque a diferencia del gráfico de la primera maceta (Fig. 14), tomó un poco más de tiempo en el riego, esto se debe a que el nivel mínimo de humedad establecido es de 65%, por otro lado, también se puede apreciar que la humedad de suelo no baja del mínimo establecido.

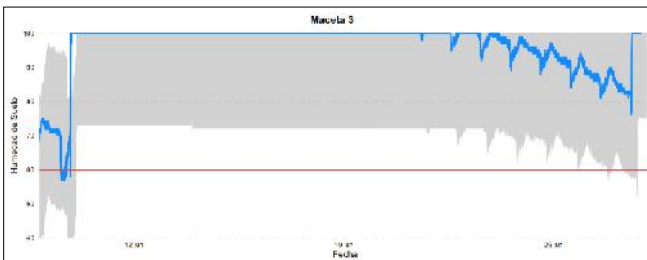


Fig. 16 Registro de humedad del suelo de la tercera maceta.
Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 16, se visualiza que inició con un porcentaje de humedad del suelo del 75% y después que este porcentaje estuvo por debajo del mínimo establecido — 60% — sube hasta 100% porque se realizó un riego. Durante algunos días este contenedor mantuvo su humedad y luego comenzó el descenso hasta llegar al mínimo establecido y realizar otro riego. En esta maceta se simuló un riego tradicional.

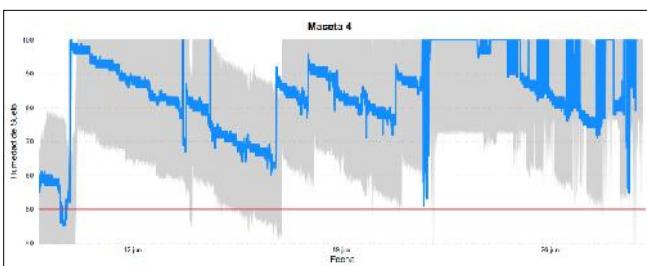


Fig. 17 Registro de humedad del suelo de la cuarta maceta.
Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 17, se observa que inició con un porcentaje de humedad del suelo del 60% y después que este porcentaje se encontró por debajo del mínimo establecido — 50% — sube a un 100% porque se realizó un riego, luego, comenzó el descenso de humedad y al encontrarse otra vez en el mínimo establecido sube la humedad, se observa también que la

humedad del suelo se mantiene en el mínimo establecido. En este contenedor también se simuló un riego tradicional.

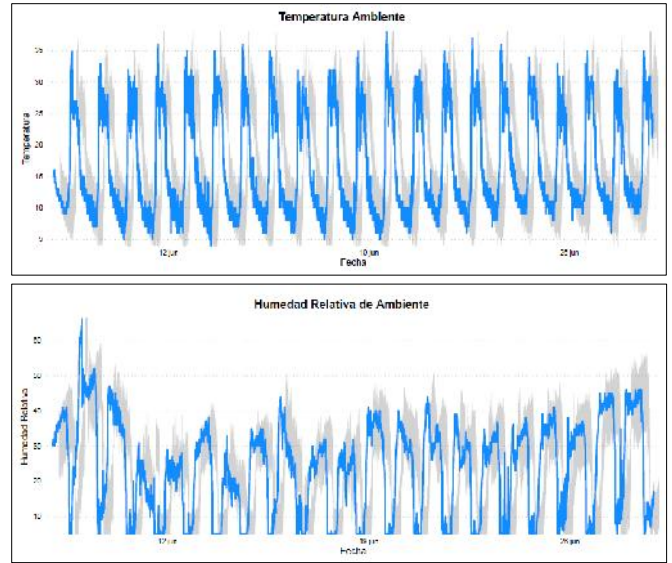


Fig. 18 Registro de humedad y temperatura ambiente.
Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 18, se observa el comportamiento de la humedad y temperatura ambiente, en donde la temperatura en ocasiones desciende por debajo de 10° C. lo que conlleva a que algunos cultivos sufran de estrés por el exceso de frío, y no logren desarrollarse adecuadamente, en la tercera y cuarta maceta se observó la falta de crecimiento del rabanito, esto se debe por las bajas temperaturas de la zona y el exceso de humedad impidiendo su desarrollo normal.

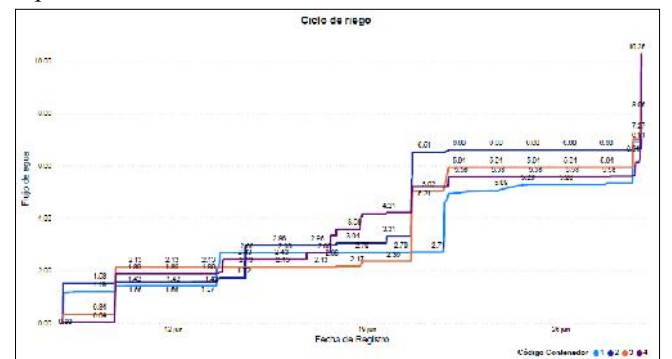


Fig. 19 Ciclos de riego.
Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 19, se observan que los riegos de las 2 primeras y 2 últimas macetas no tienen la misma frecuencia, esto se debe a que el control de riego de las primeras macetas está basado en el nivel de humedad de suelo configurado mediante el sistema propuesto, por ende, riega dependiendo de la condición en la que se encuentre el clima, es decir en días más soleados el sistema inteligente regará mucho antes de las horas habituales, por otro lado, si el clima está nublado el riego se retrasará, en cambio, en las 2 últimas macetas se simuló un riego tradicional.

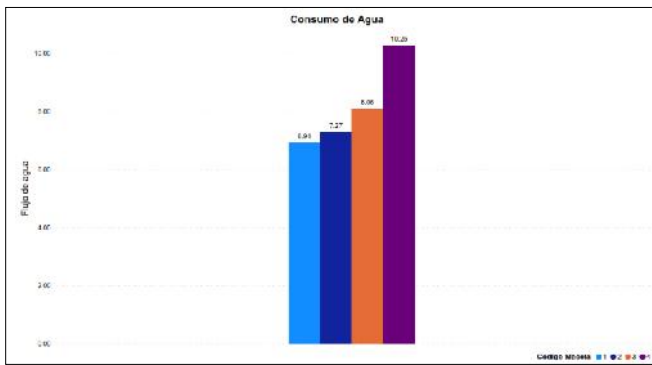


Fig. 20 Consumo de agua por maceta.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el sistema propuesto tuvo una eficiencia en el uso del agua entre 90% y 95%, esto se debe a que el sistema de riego por goteo realiza un riego localizado, además un adecuado uso del agua se evita la aparición de maleza, entre otras plagas [28]. El sistema inteligente propuesto presentó una mayor cantidad de rabanitos cosechados.

En la Fig. 20, se observa que las macetas 3 y 4 utilizaron una mayor cantidad de agua en comparación con las macetas 1 y 2, además en la Fig. 21 se puede notar una diferencia en el crecimiento del cultivo, siendo “a)” y “b)” las macetas que utilizaron el sistema inteligente propuesto y “c)” y “d)” los que simulan un riego tradicional.

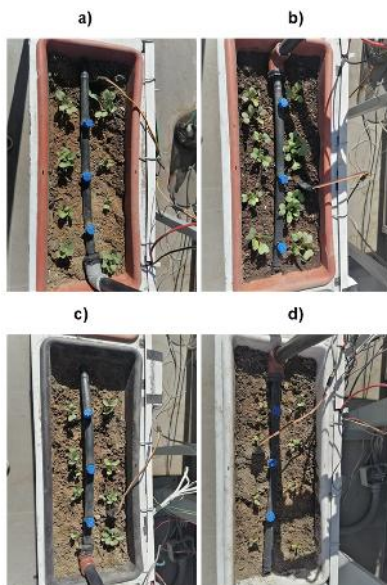


Fig. 21 Crecimiento del cultivo por macetas.
Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

En esta investigación se desarrolló un sistema inteligente para el riego utilizando el microcontrolador ESP8266, dicho sistema se encarga de monitorear y controlar el riego mediante los parámetros establecidos por el usuario. Además, tiene la

capacidad para ser controlado desde cualquier lugar con acceso a Internet permitiendo al usuario una gestión completa sobre el desarrollo de su cultivo.

Se evaluó el sistema inteligente propuesto en un espacio brindado por el área de Investigación de la Universidad Tecnológica del Perú, donde se verificó el correcto funcionamiento del sistema, este mantuvo la humedad del suelo dentro de los valores mínimos y máximos establecidos por el usuario, además la página web mostró el comportamiento de la humedad de suelo, humedad y temperatura ambiente, y flujo de agua durante todo el ciclo de crecimiento del cultivo.

Finalmente, se comparó el consumo hídrico de los cultivos en los que se utilizó el sistema inteligente para el riego versus los cultivos en los que se simuló el riego tradicional y se evidenció que el sistema inteligente propuesto tiene un manejo eficiente del 95% del recurso hídrico al consumir menos cantidad de agua en comparación con los cultivos donde se simuló un riego tradicional, además los cultivos en los que se utilizó el sistema propuesto dieron como resultado una mayor cantidad de rabanitos cosechados.

RECOMENDACIONES

En caso de la aplicación en el campo, se debe tener en cuenta que muchas veces no se dispone de energía eléctrica cercana, ni tampoco una red Wifi para que el microcontrolador pueda conectarse y pueda enviar/recibir datos, para esto, se puede usar un microcontrolador que tenga integrado GSM (Sistema Global de Comunicaciones Móviles), GPRS (General Packet Radio Service) para que pueda ser controlado desde cualquier lugar. Opcionalmente se puede añadir un panel solar con una batería para la alimentación del microcontrolador.

Uno de los pros de implementar este tipo de tecnologías es que al tener controlada el agua se evita gastar en pesticidas, y gracias al trabajo realizado, también se podría decir que la calidad del producto aumenta, generando así más ingresos para el agricultor al momento de vender el producto.

REFERENCIAS

- [1] L. A. Gurovich, *Fundamentos y diseño de sistemas de riego*. San José, Costa Rica: IICA, 1985.
- [2] Fitria, “Uso Eficiente del agua en la agricultura con fines de conservación,” *J Chem Inf Model*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [3] M. Damián Huato *et al.*, “Agricultura familiar y seguridad alimentaria entre productores de maíz de temporal en México,” *Agroecología*, vol. 9, no. 1, pp. 89–99, 2014.
- [4] “OVERCOMING WATER CHALLENGES IN AGRICULTURE,” *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 2020, doi: 10.4060/cb1447en.
- [5] E. Mayhua López *et al.*, “Automatic Drip Irrigation System by using a Wireless Sensors Network,”

- Revista de Investigación (Arequipa)*, vol. 7, pp. 69–92, 2016.
- [6] E. Sánchez Duarte, “LAS TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN (TIC) DESDE UNA PERSPECTIVA SOCIAL,” pp. 1409–1451, 2008.
- [7] L. Beduschi *et al.*, “La agricultura digital en América Latina y la necesidad de agendas sectoriales por país,” in *Digitalización y cambio tecnológico en las mipymes tecnológicas y agroindustriales agrícolas y agroindustriales en América Latina*, 2021, pp. 17–30.
- [8] M. Haras and T. Skotnicki, “Thermoelectricity for IoT – A review,” *Nano Energy*, vol. 54, pp. 461–476, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.NANOEN.2018.10.013.
- [9] I. Mat, M. R. Mohd Kassim, A. N. Harun, and I. Mat Yusoff, “IoT in Precision Agriculture applications using Wireless Moisture Sensor Network,” *ICOS 2016 - 2016 IEEE Conference on Open Systems*, pp. 24–29, Mar. 2017, doi: 10.1109/ICOS.2016.7881983.
- [10] *Guide to Hydrological Practice*, 2008th ed., vol. I. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2008.
- [11] Agriculus, “Sensores para la agricultura,” <https://www.agriculus.com/es/tecnologias/sensores-para-la-agricultura/>, 2022.
- [12] K. G. Liakos, P. Busato, D. Moshou, S. Pearson, and D. Bochtis, “Machine learning in agriculture: A review,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 8. MDPI AG, Aug. 14, 2018. doi: 10.3390/s18082674.
- [13] *Guide to Hydrological Practice*, 2008th ed., vol. I. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2008. Accessed: Feb. 17, 2022. [Online]. Available: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10473
- [14] S. I. Ossa Duque, “Monitoreo y control de variables ambientales mediante una red inalámbrica para agricultura de precisión en invernaderos,” *Vector*, pp. 51–60, Jan. 12, 2017. Accessed: Feb. 17, 2022. [Online]. Available: http://vector.ucaldas.edu.co/downloads/Vector12_6.pdf
- [15] F. Ejeian *et al.*, “Design and applications of MEMS flow sensors: A review,” *Sens Actuators A Phys*, vol. 295, pp. 483–502, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.sna.2019.06.020.
- [16] D. Xie, L. Chen, L. Liu, L. Chen, and H. Wang, “Actuators and Sensors for Application in Agricultural Robots: A Review,” *Machines*, vol. 10, no. 10. MDPI, Oct. 01, 2022. doi: 10.3390/machines10100913.
- [17] “Naylamp - Componentes electrónicos.” <https://naylampmechatronics.com> (accessed Jun. 28, 2022).
- [18] “Descubre aquello que no sabías sobre el riego tecnificado - Agroptima.” <https://www.agroptima.com/es/blog/descubre-aquello-que-no-sabias-sobre-el-riego-tecnificado/> (accessed Feb. 18, 2022).
- [19] M. Raviv, H. Lieth, and A. Bar-Tal, *Soilless Culture: Theory and Practice*, 2nd ed. 2019.
- [20] T. Rumpf, A. K. Mahlein, U. Steiner, E. C. Oerke, H. W. Dehne, and L. Plümer, “Early detection and classification of plant diseases with Support Vector Machines based on hyperspectral reflectance,” *Comput Electron Agric*, vol. 74, no. 1, pp. 91–99, Oct. 2010, doi: 10.1016/J.COMPAG.2010.06.009.
- [21] R. E. Floyd, “RFID in Animal-Tracking Applications,” *IEEE Potentials*, vol. 34, no. 5, pp. 32–33, Sep. 2015, doi: 10.1109/MPOT.2015.2410308.
- [22] J. Gutierrez, J. F. Villa-Medina, A. Nieto-Garibay, and M. A. Porta-Gandara, “Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module,” *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 63, no. 1, pp. 166–176, Jan. 2014, doi: 10.1109/TIM.2013.2276487.
- [23] A. Kaloxylou *et al.*, “The Use of Future Internet Technologies in the Agriculture and Food Sectors: Integrating the Supply Chain,” *Procedia Technology*, vol. 8, pp. 51–60, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.PROTCY.2013.11.009.
- [24] S. Darshna, T. Sangavi, S. Mohan, A. Soundharya, and S. Desikan, “Smart Irrigation System,” vol. 10, no. 3, pp. 32–36, doi: 10.9790/2834-10323236.
- [25] D. J. Oyedele, A. S. Ogunjuyigbe, J. A. Sonibare, O. S. Olawale, and O. O. Ajayi, “Development of smart irrigation system using internet of things (IoT) technology,” *J Phys Conf Ser*, vol. 1543, 2020.
- [26] R. Cairampoma, “Tipos de Investigación científica: Una simplificación de la complicada incoherente nomenclatura y clasificación,” *Revista Electrónica de Veterinaria*, vol. 16, pp. 1–14, 2015.
- [27] E. Velarde Allazo, E. Acuña Melo, and J. Aranibar Pumacota, “Proposal for Architecture for Precision Agriculture Supported in IoT for an Efficient Automatic Irrigation System,” *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 762 LNEE, pp. 27–38, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-72208-1_3/COVER/.
- [28] Fitria, “Uso Eficiente del agua en la agricultura con fines de conservación,” *J Chem Inf Model*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.