

pH Measurement IoT System for Precision Agriculture Applications

G. Archbold, *Student Member, IEEE*, A. Beltrán, F. Ruiz, *Senior Member, IEEE*, M. Narducci, *Member, IEEE*, D. Méndez, *Member, IEEE*, L. Trujillo, *Member, IEEE*, C. Parra, *Member IEEE*, H. Carrillo, *Member IEEE*, and A. Mouazen

Abstract—This paper presents the design and validation of a pH measurement IoT system for Precision Agriculture applications. The system is based on an IoT architecture which consist on: data acquisition and processing, information, centralization and access to users. The design process of each module is reported as well as its experimental validation process. With a $-0.058V$ slope for pH measurement and RMSE of 0.037 for the calibration model, we demonstrated the capability of the system to perform measurements at multiple points in large areas.

Index Terms—IoT, Precision Agriculture, ISFET Sensor, Drain-Source Follower.

I. INTRODUCCIÓN

UNO de los mayores retos que ha enfrentado el sector de la agricultura en los últimos tiempos es el manejo sostenible y el aumento de la productividad en los cultivos. Esto tiene como objetivo, obtener producciones de alta cantidad y calidad que permitan atender no solo las demandas del comercio local, nacional e internacional, sino también afrontar los problemas de seguridad alimentaria en muchos países, sobre todo aquellos que se encuentran en vía de desarrollo. Sin embargo, para alcanzar estos retos se debe hacer frente a las variabilidades agroecológicas que se presentan en los sitios de cultivo. Estas variabilidades pueden ser agroclimáticas (temperatura, precipitación, humedad, radiación solar, etc.) y/o fisicoquímicas a nivel de los suelos (contenidos nutricionales, niveles de pH, capacidad de intercambio catiónico, textura, materia orgánica, etc.).

G. W. Archbold, Pontificia Universidad Javeriana y Ghent University, Ghent, Belgium, archbold.george@javeriana.edu.co.

A. Beltrán, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, beltran_h@javeriana.edu.co.

F. Ruiz, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, ruizf@javeriana.edu.co.

M. Narducci, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, m.narducci@javeriana.edu.co.

D. Méndez, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia, diego-mendez@javeriana.edu.co.

L. Trujillo, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, trujillo.luis@javeriana.edu.co.

C. Parra, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, carlos.parra@javeriana.edu.co.

H. Carrillo, Genius Sports, Medellín, Colombia, henry.carrillo@geniussports.com

A. M. Mouazen, Ghent University, Ghent, Belgium, abdul.Mouazen@UGent.be.

A esto se suma la carencia de medios tecnológicos y sistemáticos que permitan ejecutar mediciones, trazabilidades y actuaciones sobre los procesos agrícolas [1].

Por su parte, la Agricultura de Precisión (AP) es una Estrategia de gestión que utiliza las tecnologías de la información para llevar datos de múltiples fuentes a las decisiones relacionadas con la producción de cultivos y el análisis de la variabilidad del agro-ecosistema. [2].

En este sentido, es posible destacar que la AP es una estrategia útil para el sector agrícola. Por ejemplo, la generación de grandes volúmenes de información mediante el uso de herramientas tecnológicas especializadas es una de las principales aplicaciones de la AP y su implementación obedece al fortalecimiento de los procesos en la toma de decisiones para el acondicionamiento y mejoramiento de los suelos agrícolas. Para ello, la AP se basa en los mismos criterios ofertados por un análisis rutinario de un laboratorio de suelos (medición y análisis de los niveles de macronutrientes y micronutrientes, niveles de pH, contenido de agua, temperatura, humedad, materia orgánica, topografía y color del suelo, entre otros). A diferencia de un laboratorio, el objetivo de la AP es mejorar la resolución espacial de medición en áreas de cultivo, mediante la implementación de sensores y plataformas que permitan realizar mediciones in situ y en línea de manera móvil o no móvil [3]. De acuerdo con [4], estos sensores pueden ser electroquímicos, ópticos, radiométricos, mecánicos y/o neumáticos, siendo los sensores electroquímicos una opción económica (en múltiples casos) y práctica para la medición de algunas propiedades químicas del suelo. Por otro lado, el análisis químico de la información proveniente del suelo, realizado a través de la AP, permite ejecutar aplicaciones rentables de fertilizantes, cal y otras enmiendas de suelo [4].

En la Agricultura de Precisión, una de las variables más importantes para el análisis de suelos es el pH. Su medición permite conocer los niveles de acidez o basicidad presentes en una solución acuosa. Esta variable es clave para la agricultura ya que su conocimiento aporta información en los procesos de fertilización y biorremediación del suelo. Por otro lado, el pH del suelo es a menudo llamado la “variable principal del suelo”, ya que influye en numerosas propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo y en procesos que afectan el crecimiento de las plantas [5]. También es una variable fundamental que influye en los procesos de desnitrificación [6], afectación de la actividad bacteriana [7] y disponibilidad

de nutrientes en el suelo [8]. Múltiples trabajos se han centrado en el análisis de suelos, en especial la medición de los niveles de pH. Por ejemplo, en la AP existen las plataformas On-The-Go (vehículos móviles, como por ejemplo los tractores, con la capacidad de portar arreglos de sensores y realizar mediciones de tiempo real en suelos) que integran sensores electroquímicos del tipo ISE (Ion Selective Electrode) o ISFET (Ion Sensitive Field Effect Transistor) para el conocimiento del pH en los suelos. Estas plataformas generan altos volúmenes de información que conllevan a la creación de mapas de rendimiento o de concentraciones basados en la variabilidad espacial de las concentraciones del pH en suelos agrícolas [9], [10], [11] y [12].

La AP requiere de sistemas que permitan adquirir, procesar y transmitir la información con el objetivo de presentar al usuario, de manera interactiva ya sea local y/o remotamente, el estado de las variables de interés en los procesos agrícolas. Una forma de abordar este tipo de necesidades es mediante el Internet de las Cosas (IoT), el cual se ha convertido en un paradigma tecnológico para hacer la sociedad más productiva. Particularmente, IoT se ha convertido en un concepto flexible bajo el cual la integración de múltiples fuentes de información, en determinado entorno, pueden converger de manera versátil. Dicha versatilidad se da a través de implementaciones que integran Redes de Sensores Inalámbricos WSN (Wireless Sensor Networks) para asegurar la cobertura, calidad y seguridad de los datos [13], técnicas de Big Data para la posterior organización, análisis y procesamiento de los datos [14] y finalmente, estructuras "Data Storage" para el posprocesamiento y almacenamiento de los datos a través de servicios de Cloud Computing [15].

Existen diferentes casos de aplicación del IoT, como en el monitoreo de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica en el amazonas para analizar niveles de confort termal [16], el monitoreo de la salud ambiental y personal, el monitoreo y el control de los procesos industriales, incluyendo la agricultura, los espacios y las ciudades inteligentes [17]. También existen muchas aplicaciones IoT en las cuales se ha monitoreado el estado del pH, por ejemplo, control automático de aguas de riego [18], sensores Wireless con entradas potenciométricas para la medición de pH con sensores ISE [19], monitoreo inteligente del cultivo de la papa [20], control de nutrientes en cultivos hidropónicos [21] y monitoreo remoto de pH, humedad y temperatura en el suelo [22].

Dada la importancia de la medición de la variable pH en el contexto de la agricultura de precisión y el aporte otorgado al aumento de la resolución espacial de las mediciones en los campos agrícolas, el presente artículo describe el diseño y la implementación de un sistema IoT para el monitoreo continuo de pH.

Entre otros, este sistema cuenta con visualización *in situ* a través de una pantalla LCD (*Liquid Crystal Display*), geo-posicionamiento, visualización y almacenamiento de la información en un servidor web local, así como el reporte de información en una plataforma de almacenamiento y visualización de datos en la nube. El sistema se basa en la plataforma IoT Intel Edison para la centralización y

posprocesamiento de toda la información.

El presente trabajo está dividido de la siguiente forma: en la sección II se reporta la arquitectura generalizada del sistema y se explica cada uno de sus módulos. En la sección III se muestra el diseño del sistema conformado por el circuito de acondicionamiento electrónico, calibración del sensor, adquisición de la señal de GPS y las rutinas establecidas para el sistema embebido, y en la sección IV se discute la experimentación, el análisis de los resultados y las ventajas de la plataforma. Finalmente, en la sección V se resume el trabajo realizado y se presentan los posibles retos a futuro con este tipo de plataformas tecnológicas.

II. ARQUITECTURA PROPUESTA

Existen múltiples arquitecturas que permiten abordar un diseño específico, sin embargo, esto depende del tipo de escenario IoT de aplicabilidad. De acuerdo con [23], algunas aplicaciones específicas que han consolidado sus arquitecturas corresponden a computación en la nube, computación social, seguridad, logística, RFID (Radio Frequency Identification), redes de sensores inalámbricos, arquitecturas orientadas a servicios, gestión de la cadena de suministro, industria, salud y ciudades inteligentes. Según el autor, estas arquitecturas pueden ser vistas como sistemas físicos, virtuales o híbridos. Su composición se basa en varios elementos como cosas físicas activas (sensores, actuadores), servicios en la nube, protocolos IoT específicos, capas de comunicación, usuarios, desarrolladores y empresas. Por otro lado, las aplicaciones IoT enfocadas hacia la agricultura se pueden encontrar en el dominio de las redes de sensores. En [24] se presenta la arquitectura IoT de un sistema de medición y control de variables ambientales (temperatura y humedad) que intervienen en la producción de cultivos en invernaderos.

Teniendo en cuenta la importancia de las arquitecturas IoT para el diseño de soluciones tecnológicas en sectores productivos de la sociedad, se plantea una arquitectura flexible que permita abordar la finalidad del presente trabajo: medir la concentración de pH (en una solución acuosa) asociada a una geoposición y desplegar la información adquirida de manera local y remota. En la Fig. 1 se evidencia la arquitectura generalizada para el sistema, la cual consta de tres módulos: módulo de adquisición y procesamiento de datos, módulo de centralización de la información y módulo de acceso al usuario.

A. Adquisición y Procesamiento de Datos

Este módulo se encarga de adquirir, adecuar y transmitir los datos de pH y geo-posicionamiento hacia el módulo de centralización de la información. Se usan dos sensores: un sensor electroquímico y una antena GPS (*Global Positioning System*). El sensor ISFET ofrece un rango de medición de entre 1.5 y 11.5 unidades de pH. Para el correcto funcionamiento de este sensor se requiere una etapa de adecuación que logre asegurar las condiciones de operación propuestas por el fabricante. El segundo sensor corresponde a un GPS el cual permite obtener las coordenadas de longitud y latitud del sitio o posición en donde se realice cada medición

de pH. Además de los sensores, se tiene un microcontrolador el cual se encarga adquirir la información proveniente de los sensores y posteriormente, enviar esta información como una trama de datos al módulo de centralización de la información.

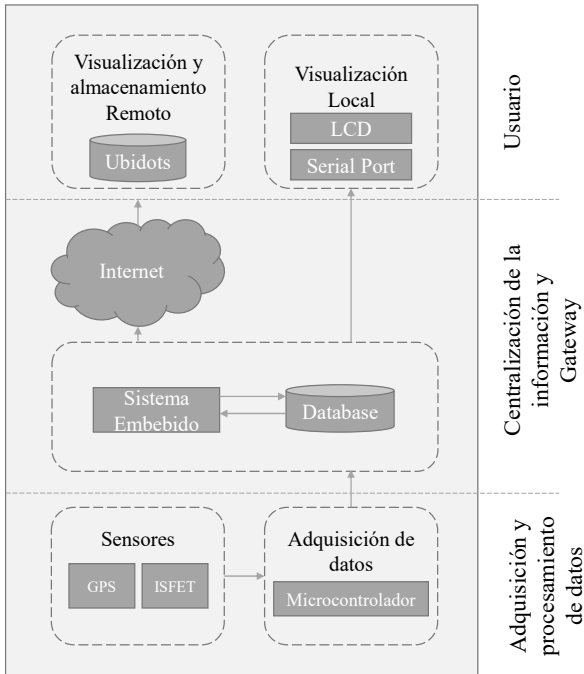


Fig. 1. Arquitectura generalizada del sistema.

B. Centralización de la Información

Un sistema embebido de alta capacidad basado en un procesador Intel Quark™ SoC X1000 es el encargado de centralizar toda la información proveniente del módulo de adquisición; concentración del pH medido y geoposición. Estos datos son almacenados de manera local mediante una base de datos y, de igual manera, son transmitidos *en línea* al módulo de usuario. El sistema embebido cuenta con una capacidad de almacenamiento de 4GB eMMC (Embedded Multimedia Card).

C. Usuario

En este módulo se despliega la información adquirida hacia el usuario final. El dato de pH con su respectiva geoposición es visualizado de manera local en una pantalla LCD. De manera remota, se usa el servicio UBIDOTS® para el almacenamiento de la información y el despliegue de datos mediante *dashboards* personalizados que permiten una mejor interacción usuario-sistema.

III. DISEÑO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS.

El diseño del sistema involucra tres etapas. La primera es la adecuación de la señal proveniente del sensor ISFET, la segunda etapa consiste en la calibración del sensor ISFET y la adquisición de la señal proveniente del GPS. Por último, la tercera etapa hace referencia al ajuste de las rutinas del sistema embebido. En la Fig. 2 se evidencian los componentes

específicos de la arquitectura del sistema y la interacción entre los distintos sub-sistemas.

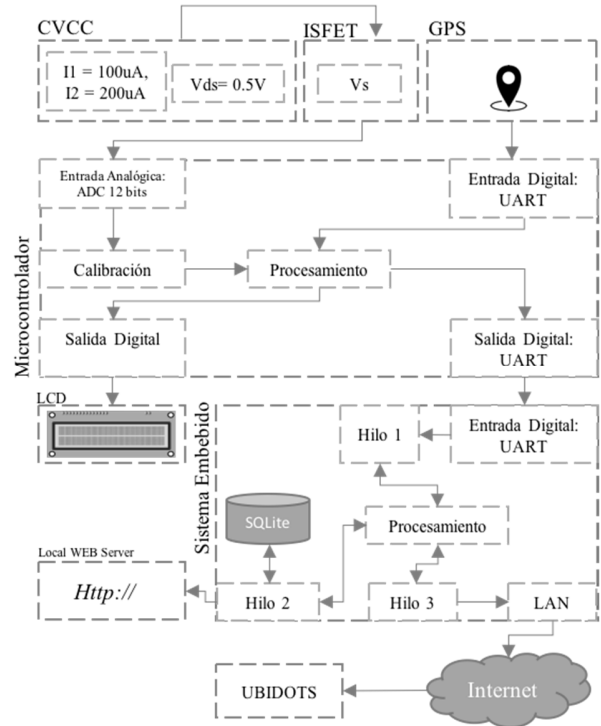


Fig. 2. Interacción de los sub-sistemas.

A. Circuito de Acondicionamiento Electrónico y Adquisición de Datos

El sensor electroquímico usado para la medición de pH es el ISFET MSFET 3330 del fabricante MICROSENS. El Transistor de Efecto de Campo Sensible a Iones (ISFET) es un dispositivo electroquímico que fue introducido por Piet Bergveld en la década de 1970 [25]. Este dispositivo de estado sólido combina un transistor de efecto de campo con una membrana polimérica sensible a los iones. Para realizar las mediciones, el sensor se sumerge en la solución acuosa a medir. El ISFET MSFET 3330 presenta un rango de medición el cual se encuentra entre 1.5 y 11.5 unidades de pH. Dentro de las especificaciones otorgadas por el fabricante para el correcto funcionamiento del sensor, se encuentra que su voltaje drain-source (V_{DS}) debe ser 0.5V y la corriente de drain ($I_{DS} = I_1$) debe ser de 100uA.

Existen varios circuitos electrónicos o topologías *Front-End* que permiten asegurar estos parámetros. Una de las topologías que se acomoda a los requerimientos del fabricante es el circuito CVCC (*Current Voltage Constant Circuit*) o seguidor de tensión y corriente [25] el cual se muestra en la Fig. 3. En este circuito, los valores de I_{DS} y V_{DS} del sensor ISFET se mantienen constantes, produciendo una tensión de salida V_s en el circuito la cual es proporcional a los cambios en el pH medido.

De acuerdo con la Fig. 3, se requieren dos fuentes de corrientes ($I_1 = 100\mu A$ y $I_2 = 200\mu A$). Para esto, se implementa la configuración *MOSFET cascode current mirror* debido a su capacidad de mantener constante la corriente y el voltaje, otorgando alta impedancia de salida [26]. La primera Fuente,

$I_1 = 100\mu A$, se diseñó con 4 mosfets canal P, mientras que la fuente $I_2 = 200\mu A$ se diseñó con 4 mosfets tipo N.

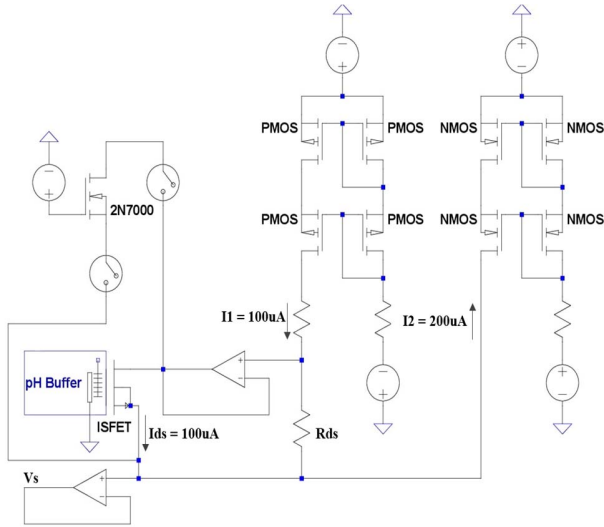


Fig. 3. Circuito CVCC (Current Voltage Constant Circuit).

Una vez el sensor se adapta a los parámetros $I_{ds} = 100\mu A$ y $V_{ds} = 0.5V$, se obtiene un voltaje V_s el cual es proporcional a los cambios de pH. Dicho voltaje es acoplado mediante un amplificador operacional en modo seguidor de tensión. Ahora bien, el voltaje V_s es adquirido mediante un ADC, sin embargo, también podría ser calculado teóricamente a partir de la ecuación (1) descrita por Das [27]:

$$V_s = -\frac{1}{\beta R_{ds}} - V_{th} - \frac{I_{ds} R_{ds}}{2} \quad (1)$$

En la anterior ecuación, V_{th} corresponde al voltaje threshold del ISFET y β es una constante (comúnmente no otorgada por los fabricantes del sensor) que representa los parámetros físicos del mismo. La constante β equivale a $\mu C_{ox} \frac{W}{L}$ donde μ , C_{ox} , W y L corresponden a la movilidad de los portadores de carga, la capacitancia de aislamiento de compuerta, el ancho y largo del sensor ISFET, respectivamente.

Por otro lado, el voltaje V_s es filtrado a través de un filtro pasa bajos de topología Sallen Key el cual permite suprimir frecuencias superiores a los 59Hz (para evitar interferencias de la red eléctrica y transmisiones de radio), atenuar el ruido blanco, y prevenir efectos de *aliasing*, los cuales pueden corromper el proceso de cuantificación ejecutado por el ADC. En este sentido, se implementa dicho filtro (ver Fig. 4), se establece una frecuencia de corte aproximadamente de 34Hz y posteriormente se procede a seleccionar $R_1 = R_2 = 467\Omega$ y $C_1 = C_2 = 10\mu F$. Dicha selección de elementos pasivos se valida con la ecuación (2) que define la frecuencia de corte del filtro seleccionado:

$$F_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{467^2 \Omega \cdot 10^2 \mu F}} \cong 34Hz \quad (2)$$

Tanto para el circuito CVCC como para el filtro pasabajos en topología sellen key, se usaron amplificadores

operacionales de bajo costo, en este caso, el chip MCP602 de Analog Devices®.

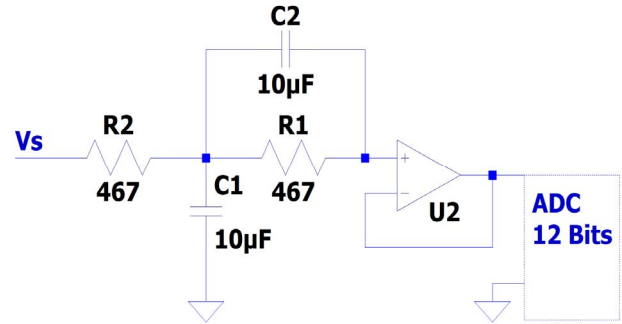


Fig. 4. Filtro pasa bajos activo en topología Sallen-Key.

Finalmente, la señal filtrada es adquirida por el ADC de 12 bits contenido en el microcontrolador STM32F4. Este microcontrolador posee la resolución suficiente para detectar los cambios de voltaje V_s proporcionales al pH ($\cong 58mV/pH$). Con $n = 12$ bits y $V_{ref-} = 0$ (voltaje de referencia negativo), la resolución del ADC se indica en la ecuación (3).

$$Resolución_{ADC} = \frac{V_{ref+}}{2^{n-1}} = \frac{5V}{2^{12} - 1} \cong 1.22mV \quad (3)$$

B. Calibración del Sensor y Adquisición Señal GPS

Con el circuito de acondicionamiento electrónico, se procede a realizar su calibración en conjunto con el sensor ISFET. Inicialmente, se ajustan los valores de $I_1 = 100\mu A$, $I_2 = 200\mu A$ y $V_{ds} = 0.5V$. De este circuito se obtiene un voltaje V_s el cual es proporcional a los cambios de pH en una solución acuosa. El procedimiento para verificar los cambios en V_s se basa en la inmersión del sensor en 3 soluciones de pH (4.1, 6.7 y 9.1 unidades de pH respectivamente). Antes de cada lectura se realiza la limpieza del sensor ISFET con agua desionizada.

Tal como se muestra en la Fig. 2, las rutinas programadas en el microcontrolador contemplan la adquisición del voltaje V_s de manera constante mediante un ADC (*Analog-to-Digital Converter*) de 12 bits. De igual manera, se contempla la adquisición de los datos del GPS por protocolo UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*), la visualización del pH medido y el geo-posicionamiento a través de una pantalla LCD, y el envío de toda esta información mediante una trama de datos al sistema embebido.

El proceso de calibración contenido en el microcontrolador se encarga de ajustar la medición otorgada por el ADC y calibrar la lectura de pH mediante una regresión lineal. Para el ajuste, se implementa en el microcontrolador un modelo de regresión obtenido a partir de mediciones realizadas con el sensor ISFET en tres puntos de pH. Del comportamiento previamente especificado por el fabricante del sensor, se deduce el uso de una regresión lineal de la cual se obtiene una pendiente de $-0.058V/pH$ la cual se aproxima a la información otorgada por el fabricante. En cuanto a la implementación del proceso de calibración, si la periodicidad de uso del sistema de medición de pH es mayor a un mes, el proceso se debe realizar previamente al muestreo de pH en campo, es decir, antes de la

jornada de trabajo. Si, por el contrario, el sistema se usa una vez por semana, el proceso de calibración se puede realizar cada 4 meses.

C. Rutinas en el Sistema Embebido

Esta plataforma ejecuta dos procesos importantes. Uno de ellos, programado en lenguaje Python, se encarga de establecer la comunicación con el sistema de almacenamiento en la nube UBIDOTS®. Para establecer dicha comunicación, el sistema embebido se conecta vía WI-FI (modulo incluido en la plataforma Intel Edison) al servidor de UBIDOTS® mediante tokens personalizados sobre HTTP. El segundo proceso escrito en lenguaje C++ cuenta con tres hilos que cumplen las funciones de comunicación con el microcontrolador, comunicación entre procesos (Python, C++) y manejo de base de datos y servidor web local.

Los tres hilos del proceso escrito en C++ cuentan con un arreglo en memoria de 38 caracteres como recurso compartido. Este recurso contiene el valor de pH y GPS el cual es sincronizado a través de un *mutex* (Exclusión mutua) [28]. El diagrama de flujo de cada hilo se puede observar en la Fig. 5(A). Este arreglo es utilizado por el primer hilo para almacenar los datos recibidos por el puerto serial que contienen la información de pH y GPS proporcionada por el microcontrolador. El segundo hilo, que es el encargado de la comunicación entre procesos, toma la información del arreglo y la almacena en un archivo de texto que es leído por el proceso escrito en Python. Finalmente, el tercer hilo concatena el arreglo junto con la hora del sistema y la envía a la base de datos para que pueda ser visualizada en el servidor web local.

D. Autonomía del Sistema

Sabiendo que la aplicación final de este prototipo está destinada al análisis de pH en suelos agrícolas (quizás aislados de cualquier fuente energética), es importante conocer el consumo eléctrico de los elementos asociados al sistema. Esto se hace con el objetivo de seleccionar correctamente un sistema de respaldo basado en baterías. En este sentido, la tabla I presenta los distintos dispositivos electrónicos usados en el sistema de medición, así como sus consumos eléctricos (corriente DC).

TABLA I
ELEMENTOS ELECTRÓNICOS ASOCIADOS AL SISTEMA DE MEDICIÓN Y SUS
RESPECTIVAS DEMANDAS EN A/H

Elemento	Consumo eléctrico[A/h]
Circuito de acondicionamiento electrónico y sistema de adquisición de datos	0.1
Sistema embebido	0.026
Sensor ISFET	300×10^{-6}
Modulo GPS	128×10^{-3}
LCD	25×10^{-3}
Total	0.28

De la tabla anterior se concluye que el consumo eléctrico del sistema corresponde a 0.28A/h. Sin embargo, el tiempo de recolección de datos de pH en determinado punto de medición equivale a 2 minutos de operación, esto quiere decir que el consumo eléctrico por punto de medición equivaldría a

9.33mA. En el presente trabajo se utilizó una batería de 12V – 7A/h la cual respaldaría al sistema con aproximadamente 25 horas de operación ininterrumpida (asumiendo un consumo de 0.28A/h).

IV. EXPERIMENTACIÓN, ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y VENTAJAS DE LA PROPUESTA

El proceso de experimentación permite validar el funcionamiento del sensor ISFET mediante el circuito de acondicionamiento electrónico previamente diseñado, así como la evaluación de todo el sistema IoT. El diagrama de flujo para este proceso de experimentación se muestra en la Fig. 5(B). Los elementos del sistema IoT usados en el experimento se pueden apreciar en la Fig. 6.

Inicialmente, se valida el funcionamiento del circuito de acondicionamiento reemplazando el sensor ISFET por un dispositivo MOSFET (Metal-oxide-semiconductor Field-Effect Transistor) 2N7000 el cual presenta similar comportamiento. Esta acción va dirigida a no causar daños en el sensor en caso de que ocurra una falla inicial del sistema.

Para esto, se realiza la conexión del dispositivo 2N7000 como si se hiciera con el sensor ISFET (ver Fig. 3). La única diferencia es que el voltaje en *gate* (V_G) del NMOS debe estar polarizado con una fuente de voltaje que varíe de 0.515V hasta los 3.002V. Para la condición $V_G < 1.04V$ el transistor no alcanza su voltaje de umbral lo cual impide un cambio en el valor de V_s .

Sin embargo, para valores óptimos de voltaje de umbral en este dispositivo ($1.04V < V_G < 3.002V$) se tienen cambios notorios en V_s y se cumple la condición de mantener constante I_{ds} y V_{ds} , tal como se muestra en la Fig. 8(A). Los interruptores del circuito CVCC mostrado en la Fig. 3 expresan la acción de reemplazar el sensor ISFET al momento de realizar la validación antes mencionada. Sin embargo, este proceso podría ser automatizado a través de cualquier switch SPST como, por ejemplo, el circuito integrado ADG441 de Analog Devices®.

Una vez se valida el circuito de acondicionamiento electrónico, se comprueba el funcionamiento del sensor ISFET. Esto se logra sumergiendo el sensor en buffers de pH 4.1, 6.7 y 9.1 respectivamente, durante aproximadamente 55 segundos para obtener un total de 55 muestras. En la Fig. 8(B) se muestra la medición de V_s para los buffers 4.1, 6.7 y 9.1 de los cuales se obtuvieron varianzas de $6.2 \times 10^{-5}V^2$, $6.5 \times 10^{-5}V^2$ y $4.3 \times 10^{-5}V^2$ respectivamente (ver tabla II).

En esta misma gráfica se puede apreciar que en el transcurso de los 55 segundos se presenta un efecto de drift el cual, sumado al hecho de que no existe compensación de temperatura para este sistema, puede ser un efecto no deseado para procesos que impliquen largos tiempos de medición. Los datos obtenidos se promedian y se obtiene una regresión lineal que estima el valor del pH medido mediante el modelo $y = -0.0586x + 1.5967$ el cual presenta un R^2 de 0.998 (ver Fig. 7). En este mismo orden de ideas, con el sensor calibrado, se valida el funcionamiento del sistema IoT mediante una prueba en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana.

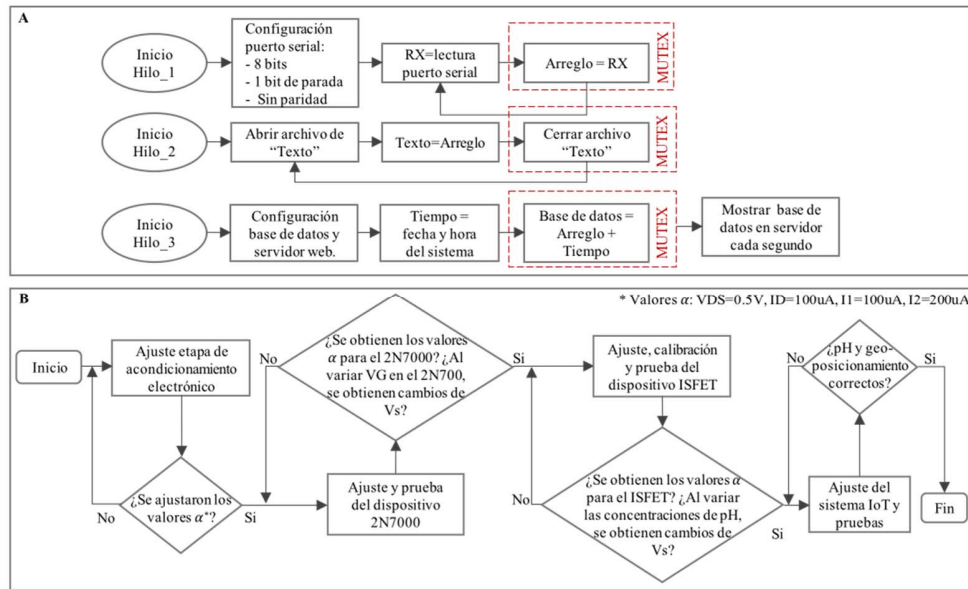


Fig. 5. Diagramas de flujo para los hilos del sistema embebido (A) y la experimentación del sistema (B).

TABLA II
DATOS ESTADÍSTICOS OBTENIDOS DURANTE EL PROCESO DE CALIBRACIÓN Y TOMA DE DATOS EN CAMPO

Calibración						
pH	CVCC output Vs [V]	Varianza [V ²]	Modelo obtenido		R ²	
			Ecuación			
4.1	1.36	6.2E-05	y = -0.0586x + 1.5967	0.998		
6.7	1.20	6.5E-05				
9.1	1.06	4.3E-05				

Sistema Calibrado							
Vs obtenido en puntos en campo[V]					pH Prom. [pH]	Var [V ²]	RMSE
1	2	3	4	5			
4.10	4.01	4.09	4.09	4.02	4.06	1.5E-03	0.037
6.70	6.67	6.70	6.70	6.72	6.70	2.5E-04	
9.10	9.14	9.10	9.12	9.10	9.11	2.64E-04	

Prom = promedio; Var = Varianza; RMSE = Raíz del error cuadrático medio

validar la capacidad del sistema para adquirir los datos provenientes del sensor ISFET y del GPS. Del experimento se obtuvieron los datos de pH con su respectiva geoposición. Se usó un GPS de referencia GARMIN eTrex H para verificar si la información entregada por el GPS ZTE MG2639 del sistema IoT es válida.

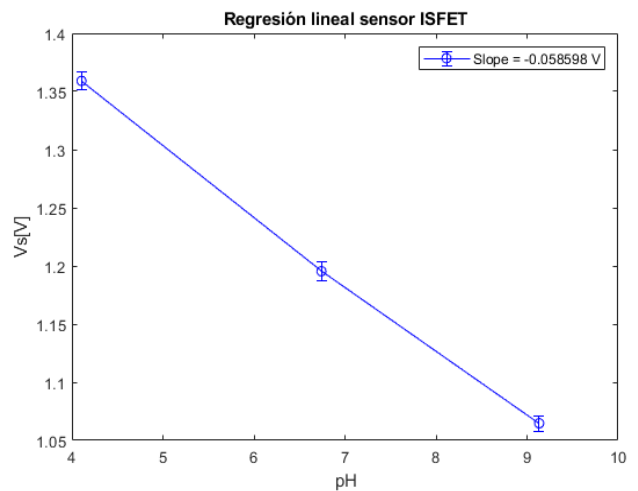


Fig. 7. Ajuste lineal entre las muestras con determinados niveles de pH y el voltaje de salida del circuito CVCC.

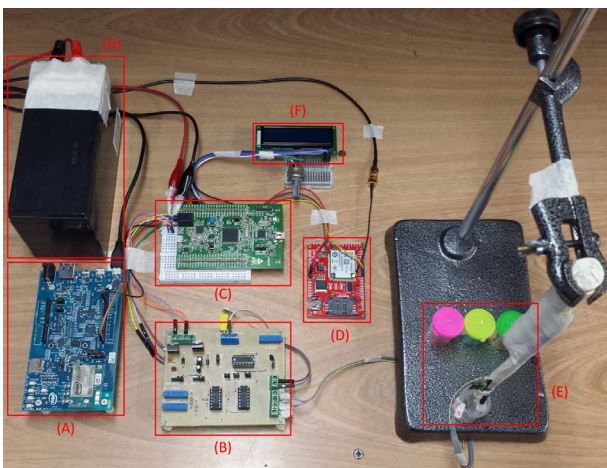


Fig. 6. Integración del sistema IoT: (A) sistema embebido Intel Edison, (B) circuito CVCC, (C) MCU STM32F4, (D) GPS ZTE MG2639, (E) sensor ISFET y buffers de pH, (F) display LCD y (F) batería de 12V-7Ah.

La prueba consiste en realizar mediciones (buffers de 4.1, 6.7 y 9.1 unidades de pH) en distintos puntos del campus y

En la Fig. 9 se observan los datos de pH, latitud y longitud obtenidos en los cinco puntos de prueba. Las varianzas para los buffers pH 4.1, 6.7 y 9.1 corresponden a $1.5 \times 10^{-3} V^2$, $2.5 \times 10^{-4} V^2$ y $2.64 \times 10^{-4} V^2$ respectivamente (ver tabla II).

Por otro lado, la Fig. 10 muestra la interfaz de usuario de la plataforma UBIDOTS en la cual se muestra la variable pH y sus historiales en el tiempo al igual que los datos provenientes del GPS.

Los resultados obtenidos muestran la capacidad del sistema ante la medición de pH, el geoposicionamiento y la visualización remota de la información obtenida. De esta

manera, se puede considerar el uso de este tipo de plataformas en aquellos entornos agrícolas que se caractericen por suelos que requieran una lectura inicial o posterior de los niveles de pH, ya sea por el formalismo de establecer las recomendaciones iniciales de fertilización o bien, para el monitoreo periódico debido a la influencia de las precipitaciones, materia orgánica, entre otras variables que pueden modificar el valor de pH, y a su vez, afectar la producción de las cosechas. Este tipo de plataformas puede acomodarse a las necesidades del sector agrícola.

Por otro lado, el uso de servicios como UBIDOTS para el almacenamiento, posprocesamiento y visualización de la información, permite cerrar el ciclo IoT, el cual empieza con la adquisición de datos y termina en el despliegue de información procesada hacia los usuarios finales. Cabe destacar, que el acceso remoto a la información es útil al momento de monitorizar ya sea en tiempo real el estado de la concentración del pH en determinadas posiciones geográficas o simplemente para acceder al historial de toda la información adquirida por la plataforma IoT. De esta manera, el concepto de almacenar y visualizar los datos en la *nube* toma valor dentro de las aplicaciones del sector agrícola [29]. Esto permite a los ingenieros agrícolas, agricultores o personas del gremio, acceder a la información de manera flexible y de igual manera, mejorar la trazabilidad de las variables definidas dentro de procesos que permitan el mejoramiento continuo de las actividades agrícolas.

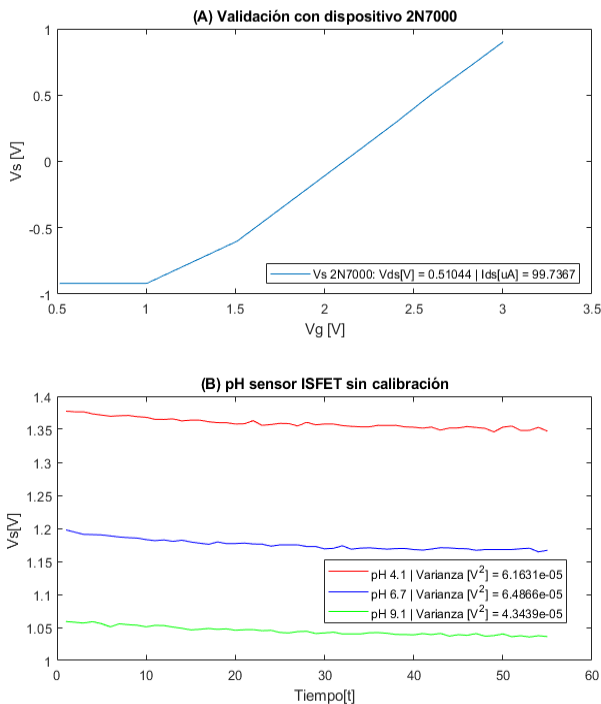


Fig. 8. (A) Validación del dispositivo 2N7000 en el circuito de acondicionamiento. (B) Validación del sensor de pH en el circuito de acondicionamiento para buffers de 4.1, 6.7 y 9.1.

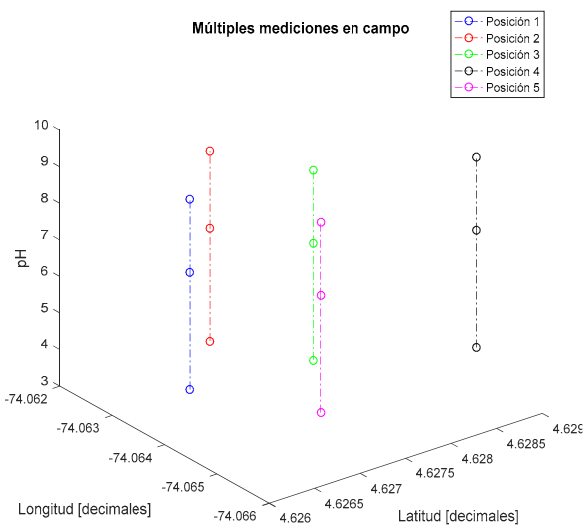


Fig. 9. Validación de las mediciones de pH y geo-posicionamiento en distintos puntos geográficos.

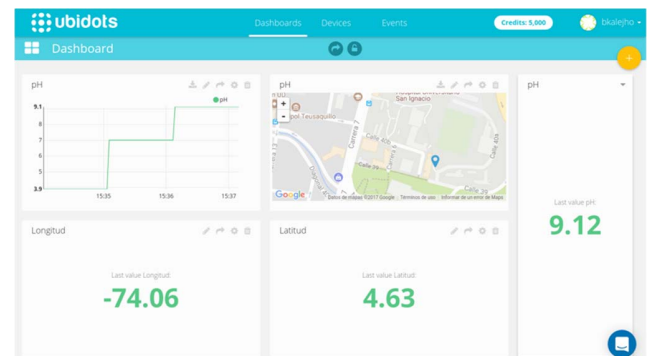


Fig. 10. Plataforma UBIDOTS para la interacción con el usuario final.

Otro campo que se fortalece con este tipo de sistemas es el de la *Agricultura 4.0* el cual, dentro de sus múltiples aplicaciones, usa sensores de bajo costo para generar información en formato digital para todos los sectores y procesos agrícolas.

Por su parte, el desempeño de la plataforma propuesta en el presente trabajo muestra determinadas ventajas respecto a algunos trabajos similares encontrados en la literatura. Por ejemplo, los sensores electroquímicos ISFET usados en este trabajo poseen un tamaño reducido (alrededor de 50cm x 5cm - Microsens) adecuado para la elaboración de prototipos in-situ, tiempos de lectura moderados (<5s) y circuitos electrónicos activos como el CVCC que garantizan la estabilidad de la señal y la operatividad del sensor. Por otro lado, trabajos como [19], [30] usan sensores ISE (Ion Selective Electrode) los cuales poseen mayores dimensiones (alrededor de 19cm x 1cm - Sentek), tiempos de lectura por encima de los 10s y circuitos que se basan en el solo uso de buffers seguidores de tensión los cuales no garantizan un correcto acondicionamiento de la señal.

En este mismo orden de ideas, otra ventaja que posee la presente propuesta es la robustez del sistema embebido ya que al contar con un sistema multithreading de 3 hilos posibilita el uso de técnicas mutex para un fácil acceso a recursos compartidos (ej. valores de las variables pH y geo-posicionamiento), mientras que otros trabajos [31]–[33]

acceden a los recursos de manera secuencial, lo cual puede ser crítico para procesos en los que los tiempos y la adquisición de múltiples variables suelen ser críticos.

En cuanto a la arquitectura IoT, muchos trabajos en la literatura ofrecen novedosas propuestas como el uso de arquitecturas con capas medias basadas en Websockets con brokers MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) e inclusión de estándares QoS (Quality of Service) [34], [35], sin embargo, la arquitectura aquí propuesta ofrece una estructura data-user en donde si bien no existe una red de sensores, se prioriza la lectura del pH y la georreferenciación de los datos a través de un sistema de bajo nivel para adquirir los datos, lograr su posterior procesamiento en un sistema embebido y su final despliegue, almacenamiento local y remoto a través de servicios en la nube, para lo cual se usan tokens (otorgador por UBIDOTS®) personalizados sobre HTTP.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó el diseño, la validación y la puesta en marcha de una plataforma IoT para la medición de pH y geo-posicionamiento. Esta plataforma está basada en una arquitectura que involucra tres módulos: la adquisición y el procesamiento de datos, la centralización de la información y el acceso a los usuarios. El sistema presenta una pendiente para la variable pH de -0.058V/pH debido a la alta linealidad que presenta el sensor ISFET y la implementación de una etapa de acondicionamiento electrónico (circuito CVCC) usada para acondicionar el sensor y ajustar sus señales. De igual manera, con un RMSE para el modelo obtenido equivalente a 0.037 se valida la capacidad que posee el sistema para realizar mediciones en múltiples puntos de un área extensa.

A manera de conclusión general, en este trabajo se reporta la implementación de un sistema IoT de bajo costo para la medición del pH dentro de los procesos de fertilización en suelos. Esta es una manera de fortalecer el campo de la *agricultura de precisión* desde la perspectiva de la generación de grandes volúmenes de información. De esta forma, se construyen insumos esenciales como los mapas de suelo, los cuales ayudan a visibilizar la variabilidad espacial (en este caso del pH), permitiendo que los principales actores del sector conozcan las distintas dinámicas de la variable pH de una manera cuantitativa. Incluso, estos sistemas pueden ser esenciales en los cultivos hidropónicos y acuapónicos, en donde el monitoreo del pH debe hacerse de manera continua ya que los procesos de compensación de nutrientes se pueden dar de manera automática.

Como trabajo futuro, se plantean investigar los retos que permitan el mejoramiento de la plataforma reportada y su integración en sistemas de agricultura de precisión. En particular, los efectos no ideales del sensor ISFET como la afectación por temperatura, el drift y los efectos del ruido requieren de otros circuitos de acondicionamiento electrónico para su atenuación o eliminación total. También es importante investigar la implementación de otros sensores ISFET en los sistemas de AP que midan las concentraciones de nutrientes como el potasio, nitrato y sodio. Para realizar dicha integración o incluso la integración de múltiples sensores

ISFET es posible usar un solo electrodo de referencia adicionando un circuito CVCC por cada sensor. De igual manera, es posible implementar un sistema CVCC con multiplexores analógicos de baja impedancia que permitan multiplexar las señales provenientes de múltiples sensores ISFET.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la colaboración de todos los socios dentro del proyecto Centro de Excelencia y Apropiación en Internet de las Cosas (CEA-IoT). Los autores también desean agradecer a todas las instituciones que apoyaron este trabajo: el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones – MinTIC de Colombia y al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación – Colciencias, a través del Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, Tecnología y la Innovación Francisco José de Caldas (ID Proyecto: FP44842-502-2015).

G. Archbold recibió una beca para estudios doctorales de la Gobernación de Bolívar y su programa de Becas *Bolívar Gana con Ciencia*.

H. Beltrán fue de la beca para la formación de capital humano de alto nivel otorgada por la gobernación del Meta.

REFERENCIAS

- [1] D. R. Lee, S. American, A. Economics, P. I. Dec, and D. R. Lee, "Agricultural Sustainability and Technology Adoption: Issues and Policies for Developing Countries Published by: Oxford University Press on behalf of the Agricultural & Applied Economics Association Stable URL," *Agric. Appl. Econ. Assoc.*, vol. 87, no. 5, 2005.
- [2] M. Li and S. Chung, "Special issue on precision agriculture," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 112, p. 1, 2015.
- [3] B. Kuang, H. S. Mahmood, M. Z. Qurashi, W. B. Hoogmoed, and A. M. Mouazen, *Sensing Soil Properties in the Laboratory, In Situ, and On-Line: A Review*, 1st ed., vol. 114. Elsevier Inc., 2012.
- [4] V. I. Adamchuk, J. W. Hummel, M. T. Morgan, and S. K. Upadhyaya, "On-the-go soil sensors for precision agriculture," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 44, no. 1, pp. 71–91, 2004.
- [5] B. Minasny, S. Y. Hong, A. E. Hartemink, Y. H. Kim, and S. S. Kang, "Soil pH increase under paddy in South Korea between 2000 and 2012," *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 221, pp. 205–213, 2016.
- [6] A. L. Russenes, A. Korsaeht, L. R. Bakken, and P. Dorsch, "Spatial variation in soil pH controls off-season N₂O emission in an agricultural soil," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 99, pp. 36–46, 2016.
- [7] F. Peterse, G. W. Nicol, S. Schouten, and J. S. Sinninghe Damsté, "Influence of soil pH on the abundance and distribution of core and intact polar lipid-derived branched GDGTs in soil," *Org. Geochem.*, vol. 41, no. 10, pp. 1171–1175, 2010.
- [8] J. Zhao, Y. Dong, X. Xie, X. Li, X. Zhang, and X. Shen, "Effect of annual variation in soil pH on available soil nutrients in pear orchards," *Acta Ecol. Sin.*, vol. 31, no. 4, pp. 212–216, 2011.
- [9] V. I. Adamchuk, M. T. Morgan, and D. R. Ess, "An automated sampling system for measuring soil ph," *Trans. ASAE*, vol. 42, no. 4, pp. 885–892, 1999.
- [10] R. A. V Rossel, M. Gilbertson, L. Thylen, O. Hansen, S. McVey, and A. B. McBratney, "Field measurements of soil pH and lime requirement using an on-the-go soil pH and lime requirement measurement system," *Precis. Agric. 05*, no. October, pp. 511–520, 2005.
- [11] B. Sethuramasamyraja, V. I. Adamchuk, A. Dobermann, D. B. Marx, D. D. Jones, and G. E. Meyer, "Agitated soil measurement method for integrated on-the-go mapping of soil pH, potassium and nitrate contents," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 60, no. 2, pp. 212–225, 2008.
- [12] M. Schirrmann, R. Gebbers, E. Kramer, and J. Seidel, "Soil pH mapping with an on-the-go sensor," *Sensors*, vol. 11, no. 1, pp. 573–598, 2011.
- [13] M. Ruiz, E. Álvarez, A. Serrano, and E. García, "The Convergence

between Wireless Sensor Networks and the Internet of Things; Challenges and Perspectives: a Survey,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 10, pp. 4249–4254, 2016.

- [14] A. Cravero, “Big Data Architecture and the Internet of Things: A Systematic Mapping Study,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 4, pp. 1219–1226, 2018.
- [15] B. Vanelli et al., “Internet of Things Data Storage Infrastructure in the Cloud Using NoSQL Databases,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, no. 4, pp. 737–743, 2017.
- [16] O. A. Chase, S. Member, A. N. Carvalho, E. S. S. Andrade, J. F. Almeida, and C. T. Costa, “Environmental Measurement Technology: An Approach to the Amazonian Environment,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 4, pp. 1036–1041, 2018.
- [17] and T. R. Alexander Gluhak, Ericsson Serbia Michele Nati, “A Survey on Facilities for Experimental Internet of Things Research,” *Ieee Wirel. Commun.*, no. December, pp. 2–10, 2010.
- [18] Zhang Feng, “Research on water-saving irrigation automatic control system based on internet of things,” *2011 Int. Conf. Electr. Inf. Control Eng.*, pp. 2541–2544, 2011.
- [19] P. Kassal, I. M. Steinberg, and M. D. Steinberg, “Wireless smart tag with potentiometric input for ultra low-power chemical sensing,” *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 184, pp. 254–259, 2013.
- [20] C.-R. Rad, O. Hancu, I.-A. Takacs, and G. Olteanu, “Smart Monitoring of Potato Crop: A Cyber-Physical System Architecture Model in the Field of Precision Agriculture,” *Agric. Agric. Sci. Procedia*, vol. 6, pp. 73–79, 2015.
- [21] D. Yolanda, H. Hindersah, F. Hadiatna, and M. A. Triawan, “Implementation of real-time fuzzy logic control for NFT-based hydroponic system on Internet of Things environment,” *2016 Int. Conf. Front. Inf. Technol.*, pp. 153–159, 2016.
- [22] A. Na, W. Isaac, S. Varshney, and E. Khan, “An IoT Based System for Remote Monitoring of Soil Characteristics,” in *2011 International Conference on Information Technology (InCITE) - The next generation IT Summit*, 2011, pp. 2–6.
- [23] P. . Ray, “A survey on Internet of Things,” *J. King Saud Univ. – Comput. Inf. Sci.*, vol. 1, no. 2, pp. 78–95, 2016.
- [24] J. C. Zhao, J. F. Zhang, Y. Feng, and J. X. Guo, “The study and application of the IOT technology in agriculture,” *Proc. - 2010 3rd IEEE Int. Conf. Comput. Sci. Inf. Technol. ICCSIT 2010*, vol. 2, pp. 462–465, 2010.
- [25] P. Bergveld, “Thirty years of ISFETOLOGY What happened in the past 30 years and what may happen in the next 30 years,” *Sensors Actuators B. Chem.*, vol. 88, pp. 1–20, 2003.
- [26] E. Sackinger and W. Guggenbuhl, “A High-Swing, High-Impedance MOS Cascode Circuit,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 25, no. 1, pp. 289–298, 1990.
- [27] M. P. Das, M. Bhuyan, and C. Talukdar, “Readout Circuits for Noise Compensation in ISFET Sensory System,” *Sens. Imaging*, vol. 16, no. 1, 2015.
- [28] A. S. Tanenbaum, “Sistema Operativos Modernos,” in *Computer Science and Communications Dictionary*, Computer S., vol. 53, Pearson Education, 2009, p. 185.
- [29] A. Cravero, D. Lagos, and R. Espinosa, “Big data / IoT use in wine production: A systematic mapping study,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 5, pp. 1476–1484, 2018.
- [30] A. Na, W. Isaac, S. Varshney, and E. Khan, “An IoT Based System for Remote Monitoring of Soil Characteristics,” in *2016 International Conference on Information Technology (InCITE) - The Next Generation IT Summit on the Theme - Internet of Things: Connect your Worlds*, 2016, pp. 316–320.
- [31] Z. Feng, “Research on water-saving irrigation automatic control system based on Internet of things,” in *2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering*, 2011, pp. 2541–2544.
- [32] M. Lee, J. Hwang, and H. Yoe, “Agricultural Production System Based on IoT,” in *2013 IEEE 16th International Conference on Computational Science and Engineering*, 2013, pp. 833–837.
- [33] M. Rawidean, M. Kassim, I. Mat, and A. N. Harun, “Wireless Sensor Network in Precision Agriculture Application,” in *2014 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS)*, 2014, pp. 1–5.
- [34] D. Yolanda, H. Hindersah, F. Hadiatna, and M. A. Triawan, “Implementation of Real-Time Fuzzy Logic Control for NFT-Based Hydroponic System on Internet of Things Environment,” *2016 6th Int. Conf. Syst. Eng. Technol.*, pp. 153–159, 2016.
- [35] F. Ferrández-pastor, J. M. García-chamizo, M. Nieto-hidalgo, and J.

Mora-Martínez, “Developing Ubiquitous Sensor Network Platform Using Internet of Things: Application in Precision Agriculture,” *Sensors*, vol. 16, no. 7, 2016.



George Washington Archbold Taylor es ingeniero electrónico de la Universidad Tecnológica de Bolívar (2012) y se encuentra cursando sus estudios de “Doctorado en Ingeniería” en la Pontificia Universidad Javeriana, Colombia, al igual que un doctorado en “Bioscience Engineering: Natural Resources” en Ghent University, Bélgica. Sus actividades de investigación se enfocan en el mejoramiento tecnológico del sector agrícola a través de la instrumentación electrónica, el internet de las cosas y la agricultura de precisión.



Héctor Alejandro Beltrán Torres terminó sus estudios de pregrado en ingeniería electrónica en el año 2014 en la Universidad ECCI de Bogotá - Colombia. Actualmente se encuentra cursando sus estudios de maestría en la Pontificia Universidad Javeriana. Sus campos de investigación son la estimación, los sistemas embebidos, sensores inerciales y el internet de las cosas.



Fredy Ruiz, es ingeniero electrónico de la Pontificia Universidad Javeriana (2002) y magister en ingeniería de la misma Universidad (2006). Recibió el título de PhD. en ingeniería informática y de control en el Politécnico di Torino en Italia (2009). Fue profesor visitante de la Universidad de California, Berkeley (2013). Actualmente es profesor asociado en la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana. Sus intereses de Investigación incluyen técnicas basadas en datos para control y estimación, con aplicaciones en sistemas de energía, biotecnología y robótica.



Margarita Sofía Narducci Marín terminó estudios de Ingeniería Electrónica en la Universidad del Norte en el 2004 y estudios de Maestría y Doctorado en Ingeniería Electrónica en la Universidad Autónoma de Barcelona en el 2007 y 2010 respectivamente. Desde el 2005 al 2010, estuvo vinculada al Centro Nacional de Microelectrónica de Barcelona (IMB-CNM-CSIC), donde trabajó en el diseño y desarrollo de sistemas microelectromecánicos resonantes compatibles con CMOS para aplicaciones de control de calidad del aire. Desde el 2011 al 2014, estuvo vinculada al Instituto de Microelectrónica de Singapur (A*STAR-IME), donde trabajó en el diseño y desarrollo de sistemas microelectromecánicos compatibles con CMOS para aplicaciones médicas y de telecomunicaciones. Actualmente, se encuentra trabajando

como profesora asistente en el Departamento de Ingeniería Electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana.



Diego Méndez Chaves es profesor asociado del Departamento de Electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana en Bogotá, Colombia. Recibió su PhD (2012) y M.Sc. (2011) en Ciencias de la Computación de la University of South Florida en Tampa, USA, su M. Eng (2008) de la Universidad de Los Andes y su B. Eng (2005) en

Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional en Bogotá, Colombia. Sus áreas de interés en investigación incluyen internet de las cosas, sistemas embebidos, redes inalámbricas de sensores, sensado participativo, diseño de sistemas digitales y sistemas operativos embebidos.



Luis Carlos Trujillo Arboleda, docente de la Pontificia Universidad Javeriana y gerente del Centro de Excelencia y Apropiación en Internet de las Cosas, CEA-IoT. Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca (1992), con maestría en Telemática (2005) de la misma universidad.

Experiencia en el sector TIC en desarrollo de proyectos de I+D para Telecom, antiguo operador de telecomunicaciones de Colombia, en optimización de redes de telecomunicaciones y servicios de aplicación de Internet. Áreas de interés en redes definidas por software, redes de nueva generación, gestión de redes e Internet de las Cosas.



Carlos Parra es profesor titular del Departamento de Electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana en Bogotá, Colombia. Recibió su PhD (1999) y M.Sc. (2011) en Ciencias de la Computación de la Université De Toulouse Iii (Paul Sabatier) y su B.Eng (1992) en Ingeniería Electrónica de la Pontificia universidad Javeriana en

Bogotá, Colombia. Sus áreas de interés en investigación incluyen robótica, percepción, sistemas inteligentes y visión en tiempo real.



Henry Carrillo received the B. Eng. degree in Electronics Engineering from Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia, in 2007; the M.Sc. degree in Electronics Engineering from Pontificia Universidad Javeriana, Bogota, Colombia, in 2010; and the Ph.D. degree in Computer Science from Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Spain, in 2014. He is a Senior

Computer Vision Scientist at Genius Sports, Medellín, Colombia. His research interests include the problems of mapping and localization for autonomous systems and computer vision



Abdul M. Mouazen is a Full Professor and leader of Precision Soil and Crop Engineering Group at Ghent University. He holds a PhD degree in numerical modelling of soil-tillage tools interaction. Abdul has a background in the application of engineering principles to soil and water management, with specific applications in soil dynamics, tillage, traction,

compaction, mechanical weeding, soil remediation and management and precision agriculture. He has about 20-year experience in proximal soil sensing, and he is a member of Global Proximal Soil Sensing Group. Abdul has implemented different spectroscopy techniques for the analysis of soil, manure, honey, milk, cheese, mandarin, and other food and natural materials. His has developed one of three internationally patented on-line measurement systems of soil properties.