

Sensor para medir pH en suelos: implementación de un ADC con STM32



Colaboración

David Orlando Romero Soto; Merit Cisneros González; Darío Cisneros Arreola; Manuel Ismael Mata Escobedo; Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana; Marco Antonio Arjona López; Instituto Tecnológico de La Laguna

Fecha de recepción: 06 de octubre de 2020

Fecha de aceptación: 29 de noviembre de 2022

ABSTRACT: *The pH monitoring in crops enables optimal plant development through nutrient utilization. The pH is mainly affected by two important factors such as acid rainfall and fertilizers. However, it is common that small producers do not get the necessary equipment to analyze this variable due to the high costs in the market of this type of sensor.*

The pH sensor presented in this work has the ability to determine this variable in the soil digitally, using a low-cost commercial analogic gardening sensor as a base. The readings are processed by a STM32 “blue pill” development board, and employing an EMA filter a reliable reading of the pH in the soil is obtained. The calibration and validation of the pH sensor of this work are carried out using commercial pH buffers: 9.18, 7, 6.86 and 4.01, giving as a result in the different tests developed an $R^2 = 0.96$.

KEYWORDS: *Agriculture, Datalogger, Sensor, pH, STM32.*

INTRODUCCIÓN

Entre las diferentes variables que intervienen en el área agro-industrial, la medición del pH en el suelo es un elemento destacable para la buena salud de los diferentes tipos de cultivos [1]-[4]. El correcto mantenimiento del pH en el suelo permite un mejor rendimiento de los cultivos ya que las plantas absorben correctamente los nutrientes [5], [6].

La necesidad de tener un sensor digital de pH confiable y económico es constante entre los pequeños y medianos productores de hortalizas que buscan satisfacer el mercado con productos de alta calidad mejorando su competitividad. Por esta razón, es importante migrar los métodos tradicionales de cultivo a métodos digitales que permitan monitorear las variables que interactúan en los cultivos permitiendo tener calidad en el producto final [7].

El sistema digital de medición de pH que se presenta en este artículo, utiliza como base un sensor analógico comercial de pH para suelos con aplicaciones de jardinería. Las lecturas obtenidas del sistema digital se validan mediante buffers comerciales de pH alcanzando

RESUMEN: El monitoreo del pH en los cultivos permite el desarrollo óptimo de las plantas por medio del aprovechamiento de nutrientes. El pH es afectado principalmente por dos factores importantes como las lluvias ácidas y fertilizantes. Sin embargo, es común que los pequeños productores no consigan el equipo necesario para el análisis de esta variable debido a que los costos en el mercado de este tipo de sensores son elevados.

El sensor de pH presentado en este trabajo, tiene la habilidad de determinar esta variable en el suelo de forma digital, utilizando como base un sensor comercial análogo de jardinería de bajo costo. Las lecturas son procesadas por una tarjeta de desarrollo STM32 “blue pill” y por medio de un filtro EMA se obtiene una lectura confiable del pH en el suelo. La calibración y validación del sensor de pH de este trabajo se realizan por medio de buffers comerciales de pH: 9.18, 7, 6.86 y 4.01, dando como resultado en las diferentes pruebas desarrolladas una $R^2 = 0.96$.

PALABRAS CLAVE: *Agricultura, Datalogger, Sensor, pH, STM32.*

valores de coeficiente de determinación de alrededor de 0.96. Los resultados de la validación demuestran que el monitoreo realizado con el sistema propuesto es confiable para la medición adecuada de pH en suelos destinados a la agricultura.

MATERIAL Y MÉTODOS

El proyecto se realizó en dos etapas; la primera consistió en la transformación de la señal analógica por medio del ADC integrado en el microcontrolador STM32 "blue pill" para posteriormente obtener una lectura en milivoltios (mV) en una pantalla OLED Adafruit 128x64. Mientras que en la segunda etapa se llevó a cabo una calibración de la señal en mV empleando buffers comerciales de pH donde se permitió obtener los voltajes en función al valor del pH indicado. Esto permitió generar una ecuación que transforma cualquier voltaje recopilado del sensor, en un valor de pH. Los materiales utilizados se muestran en la Tabla 1 y fueron adquiridos por medio de la plataforma de venta Aliexpress dando un total de 37.55 USD.

Tabla 1. Materiales Utilizados.

Cantidad	Descripción	Costo (USD)
1	Medidor de tierra de 3 vías	\$3.00-\$6.00
1	STM32F103C8T6 "Blue Pill"	\$7.00
1	Lector tarjetas SD Adafruit para Arduino	\$0.66
1	DS3231 RTC	\$2.70
1	OLED Adafruit 128x64 I2c	\$1.50
1	Cable USB a USB Micro	\$2.00
1	Tarjeta SD 8GB	\$3.00
1	Batería CR1220	\$1.18
1	Metro de cable calibre 24AWG de dos hilos	\$0.60
1	Batería portátil 10000 mAh	\$7.27
1	Kit buffers (9.18, 7, 6.86, 4.01)	\$4.50
1	PCB Perforada	\$1.14

Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que dependiendo de la aplicación puede eliminarse la pantalla o reducir el tamaño de la batería para disminuir los costos del sistema. Además, es importante mencionar que el mismo se encuentra protegido dentro de una protección impresa en 3D con material PLA que tiene características como alta dureza y tanto poca dilatación térmica como flexibilidad para brindar robustez y ser fácilmente empleado en aplicaciones de agricultura. Un aspecto importante a mencionar es que los costos de impresión 3D para este tipo de protecciones pueden variar dependiendo de la región geográfica.

Teoría y descripción del hardware.

Una señal analógica es un tipo de señal continua esto quiere decir que para cualquier instante en el tiempo le corresponde un valor de magnitud física (puede ser, frecuencia, voltaje, presión, fuerza como algunos ejemplos). Este tipo de señales deben ser procesadas por un conversor análogo-digital (ADC) para ser convertida a digital. La principal característica de las señales digitales es que no son continuas, son señales discretas, esto quiere decir que el valor que tiene esta señal con respecto al tiempo va a tener un valor alto o uno bajo por cada muestra (o paso) que realice [8].

El sensor de jardinería comercial básico empleado para este trabajo se muestra en la Figura 1, contiene un sensor de pH que envía una carga eléctrica a una bobina, que tiene como tarea el hacer girar una manecilla sobre una escala la cual indica el pH del suelo. En esta bobina es de donde se obtienen los pulsos eléctricos que se programan para obtener una señal digital.

El STM32F103C8T6 mostrado en la Figura 2 es un circuito integrado que destaca al tener un procesador ARM Cortex M3 de 32 bits, siendo ampliamente utilizados para trabajos en tiempo real con una buena eficiencia en el consumo de energía. Para la conversión de señales, cuenta con un ADC de 12 bits el cual da una resolución (o rango de muestras) desde 0 hasta 4098 dando una mejor precisión de lectura comparado con tarjetas de 8 bits [9].



Figura 1. Sensor 3 en 1 de jardinería.

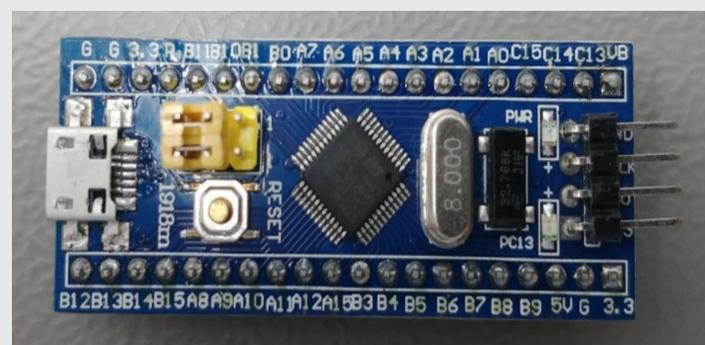


Figura 2. ST-Microelectronics. (2020). STM32 «Blue Pill» [10].

Conociendo el paso de un ADC [11] el cual se da en la Ec. 1:

$$q = \frac{V_{ref}}{2^B} \quad \text{Ec. (1)}$$

donde q representa el paso de cuantificación del ADC, mientras que 2^B es la resolución del ADC y V_{ref} es el voltaje de referencia. Cada valor de q representa una fracción del voltaje de V_{ref} , por tanto, para convertir un voltaje análogo a digital se tendría que calcular por medio de la multiplicación del voltaje de entrada al ADC por el V_{ref} y dividirse entre la resolución del ADC, dando como resultado la Ec. 2.

$$\text{Voltaje} = \frac{\text{Valor ADC}}{\text{Resolución ADC}} * V_r \quad \text{Ec. (2)}$$

donde:

- Voltaje = Valor digital del voltaje.
- ValorADC = El valor de entrada al ADC.
- Resolución ADC = Resolución del ADC (4098).
- V_{ref} = Voltaje de referencia (3.3V).

Los elementos complementarios permiten generar un dispositivo versátil que puede variar el empleo del dispositivo. En este trabajo se utilizan los módulos comerciales de lector SD y el módulo RTC para convertir el dispositivo presentado como un datalogger. Además, la pantalla ayuda a tener un seguimiento visual de la última lectura realizada, todos estos dispositivos tienen un consumo energético de 86 mA.

Diagramas de conexión

En la Figura 3 se presenta el diagrama de conexiones entre los dispositivos. Partiendo de esta conexión se procede a realizar la programación del STM32. Cabe destacar que se está utilizando el STM32 en su versión Blue Pill por medio del bootloader, la cual es una función que permite la carga y monitoreo del dispositivo por medio del IDE Arduino en el sistema operativo de Windows. Cabe mencionar que es importante realizar la instalación de un Bootloader al STM32 para realizar este proyecto en Arduino, en este caso se utilizó HID Bootloader 2.0 [12]. Este modo de carga permite una programación sencilla para el usuario.

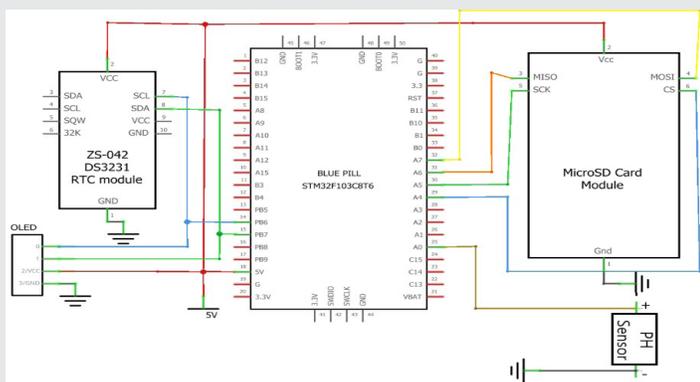


Figura 3. Diagrama de conexión.

Para programar una señal obtenida de un sistema analógico se debe de filtrar primero para poder promediar los

picos altos y bajos que se están leyendo y después usar el ADC del STM32 para lograr convertir esa señal analógica filtrada en una señal digital. El filtro seleccionado es un EMA (Exponential Moving Average) o promedio móvil exponencial, es un método de filtrado muy eficiente ya que da mayor peso e importancia a los recientes datos que entran para ser capturados [13]. De esta forma el valor que nos entregue el dispositivo podrá tener una aproximación muy cercana a la medición real (en la sección de calibración se describe el proceso que se siguió para obtener una medición precisa del sistema de medición).

El filtro está dado por la ecuación:

$$A_n = (\alpha * M) + [(1 - \alpha) * A_{n-1}] \quad \text{Ec. (3)}$$

donde:

- A_n = La señal filtrada.
- A_{n-1} = El valor filtrado anterior.
- M = El valor captado por el sensor.
- α = Factor de 0 a 1.

Calibración

La calibración es la parte fundamental para que el dispositivo sea confiable, por lo que resulta indispensable usar una tarjeta de desarrollo o microcontrolador que tenga un ADC de 12 bits. Esto es debido a que se necesita una resolución alta para que puedan ser leídos las lecturas de milivoltios que genera el sensor en valores de pH elevado.

El proceso de calibración se llevó a cabo mediante el siguiente método:

Se desmontó el sensor comercial de jardinería y se conectaron los polos del sensor a un multímetro digital, haciendo conexiones con sus respectivas polaridades.

Se sometió el sensor a 4 buffers comerciales de pH con los siguientes valores: 9.18, 7, 6.86 y 4.01 siguiendo las instrucciones de empleo de cada buffer.

Se anotaron las lecturas de los milivolts generados en el sensor en cada buffer de pH y se comparó el buffer de pH con la escala del sensor (Figura 4).

Se repitió este proceso 6 veces para comparar la repetibilidad de la calibración.



Figura 4. Lectura de milivoltios con respecto a un buffer de pH = 9.18.

RESULTADOS

Los resultados de la calibración se muestran en la Figura 5, denotando la relación que existe entre los mV y el pH durante la fase de calibración para determinar la precisión

y la función exponencial en mV que mejor se ajusta a los datos obtenidos en cada prueba en los distintos valores de pH.

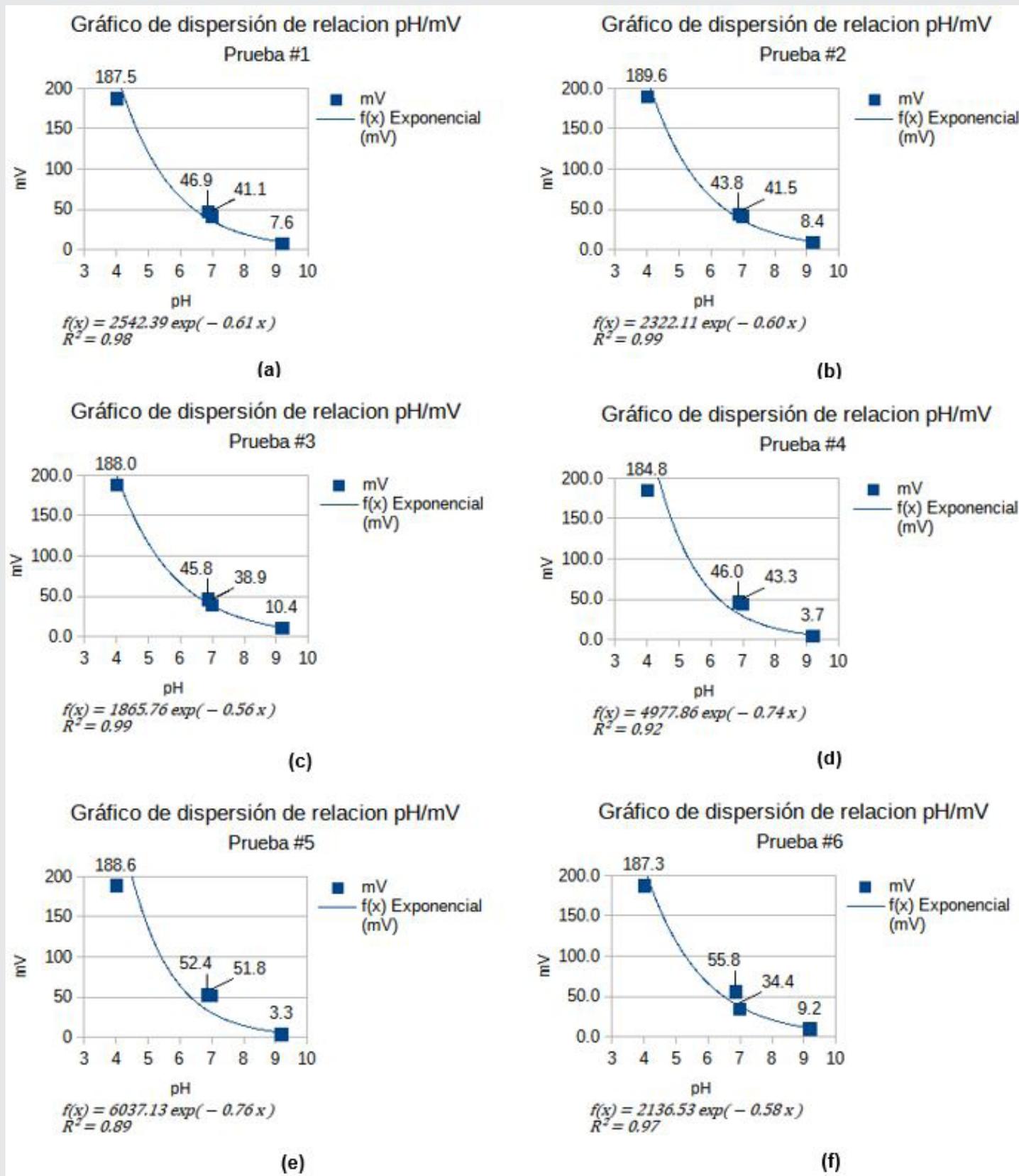


Figura 5. Pruebas de calibración

A partir de estas pruebas, se promediaron los datos para obtener la curva de calibración mostrada en la Figura 6 con su respectiva ecuación, obteniendo un $R_2 = 0.96$. Este valor representa ser una aproximación muy cercana a la medición real que está ocurriendo en el momento de tomar la lectura para la que fue programada en el STM32 para su implementación en campo [14].

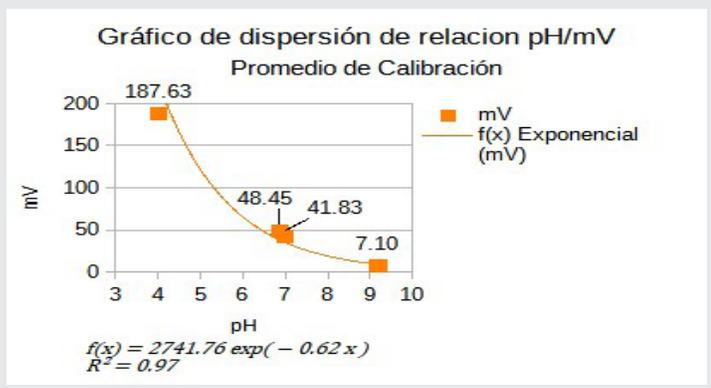


Figura 6. Promedio de calibración

La puesta en marcha del sensor fue su aplicación para fabricar un datalogger instalado en la tierra de un invernadero de tomate mostrado en la Figura 7. Esto tiene el objetivo de determinar los cambios de pH durante el día con respecto a la aplicación de fertilizantes disueltos en agua.



Figura 7. Datalogger pH en invernadero de tomate.

El ciclo de trabajo fue desde las 07:09:01 hasta las 06:39:01 tomando un valor de pH cada 30 minutos, dando como resultado las lecturas mostradas en la gráfica de la Figura 8.

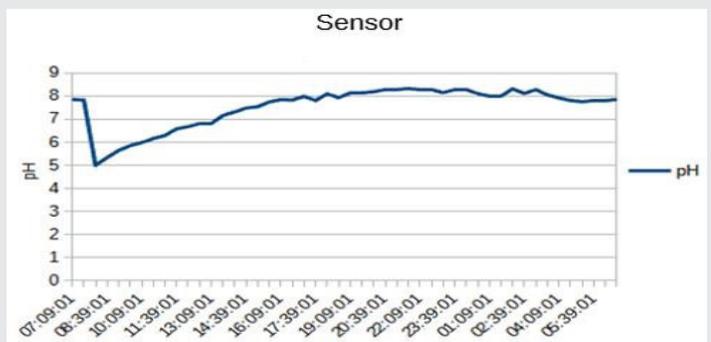


Figura 8. Valores de pH en 24 horas de prueba.

CONCLUSIONES

Los datos adquiridos por el datalogger presentado en este trabajo reflejan el comportamiento cuando se aplica el fertilizante con agua (7:00:00 horas) y su etapa de disipación comprendida de las 09:09:01 hasta las 17:39:01 horas. Dada la aplicación del fertilizante se pueden determinar la distribución y ajuste en las cantidades de fertilizante necesarias para los plantíos de tomate. Cabe mencionar que el pH del suelo necesita ser controlado para ajustarse al estándar que comprende valores de pH entre 6.0 y 6.5. Con esto se concluye el haber logrado satisfactoriamente la transformación de un sensor analógico a un sensor digital por medio de una calibración de pH estandarizados, teniendo un resultado promedio de $R_2 = 0.96$

En este caso de estudio es importante ya que el suelo tiende a ser alcalino. Sin embargo, gracias a la aplicación del fertilizante que además de aportar nutrientes a la planta, aporta la acidez necesaria al suelo para ajustarse al estándar. Dado que una alta alcalinidad provoca una corta elongación en la raíz dando como resultado un menor rendimiento de la planta. Como recomendación es ideal seguir las instrucciones de empleo del sensor comercial que vienen en el empaque y no exponerlo a largo tiempo sobre el suelo ya que las varillas tienden a generar óxido. Como trabajo futuro se buscará la manera de implementar materiales que sean resistentes a la corrosión.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Neina, D. (2019). *The Role of Soil pH in Plant Nutrition and Soil Remediation. Applied and Environmental Soil Science.*
- [2] H. Wei, Y. Liu, H. Xiang, J. Zhang, S. Li, y J. Yang (2020). «Soil pH Responses to Simulated Acid Rain Leaching in Three Agricultural Soils», *Sustainability*, vol. 12, n.o 1, Art. n.o 1, ene.
- [3] Dong, W., Zhang, X., Wang, H., Dai, X., Sun, X., Qiu, W., & Yang, F. (2012). *Effect of Different Fertilizer Application on the Soil Fertility of Paddy Soils in Red Soil Region of Southern China. PLOS ONE*, 7(9), e44504.
- [4] Odutola Oshunsanya, S. (2019). *Introductory Chapter: Relevance of Soil pH to Agriculture. En S. Oshunsanya (Ed.), Soil pH for Nutrient Availability and Crop Performance. IntechOpen.*
- [5] Putranta, H., Permatasari, A. K., Sukma, T. A., & Dwandaru, W. S. B. (2019). *The Effect of pH, Electrical Conductivity, and Nitrogen (N) in the Soil at Yogyakarta Special Region on Tomato Plant Growth.* 8(3), 6.
- [6] Kobayashi, O., Higuchi, K., Miwa, E., & Tadano, T. (2010). *Growth injury induced by high pH in rice and tomato. Soil Science and Plant Nutrition*, 56(3), 407-411.

[7] Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Kitas, C. (2017). *Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges*. *Biosystems Engineering*, 164, 31-48.

[8] Tan, L. (2019). *Digital Signal Processing Fundamentals and Applications (3.a ed.)*. Elsevier. Obtenido de: https://www.elec.inaoep.mx/~jmram/Digital_Signal_Processing__LI_TAN.pdf

[9] Carrasco, R., & Molera, I. (2020). *Construcción y programación del control de un brazo mecánico con STM32* [Universitat Politècnica de Catalunya]. Obtenido de: <https://docplayer.es/210548987-Construccion-y-programacion-del-control-de-un-brazo-mecanico-con-stm32.html>.

[10] T. Gravekamp, «STM32F103C8T6 - Blue Pill», STM32-base project, 2020. <https://stm32-base.org/boards/STM32F103C8T6-Blue-Pill.html>.

[11] Zheng, Y., Zhao, Y., Zhou, N., Wang, H., & Jiang, D. (2021). *A short review of some analog-to-digital converters resolution enhancement methods*. *Measurement*, 180, 109554.

[12] STM32duino. (2021). GitHub. <https://github.com/stm32duino>.

[13] Kumar, A. K., Sri Lakshmi, A., & Janaki Nivas Rao, P. (2020). *Moving average method based air pollution monitoring system using IoT platform*. *Journal of Physics: Conference Series*, 1706, 7.

[14] Saunders, L. J., Russell, R. A., & Crabb, D. P. (2012). *The Coefficient of Determination: What Determines a Useful R² Statistic?* *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 53(11), 6830-6832.