

## Estudio preliminar de la respuesta eléctrica de una cactácea

### Preliminary study of the electrical response of the cactus

Guerra-Sánchez, C.<sup>a\*</sup>, Sandoval-García, E.<sup>a</sup>, Sifuentes-Gallardo, C.<sup>a</sup>, De la Rosa, I.<sup>a</sup>, Sánchez-Calderón, L.<sup>a</sup>, Alaniz-Lumbreras, D.<sup>a</sup>, Ortiz-Esquivel, D.<sup>a</sup>, Felix-Esquivel, R.<sup>b</sup>.

<sup>a</sup> Universidad Autónoma de Zacatecas. Jardín Juárez #147 C.P. 98000 Zacatecas, Zacatecas, México

<sup>b</sup> Universidad Tecnológica del Estado de Zacatecas. Carretera Zacatecas, Cd. Cuauhtémoc Km 5 Ejido Cieneguitas C.P. 98601 Guadalupe, Zacatecas, México.

\* Corresponding Author: 39203905@uaz.edu.mx

Recibido: 10 de mayo 2023

Aceptado: 8 de noviembre 2023

#### Resumen

Las plantas constantemente interactúan con su entorno y responden a estímulos biológicos y ambientales. Este artículo se centra en el estudio de una cactácea, la cual es endémica y es conocida por sus propiedades medicinales. La planta responde a factores como la luz, la humedad y la disponibilidad de nutrientes a través de cambios en su respuesta físico eléctrica. Para maximizar la comprensión de estas interacciones, se propone un sistema de monitoreo que permite la recopilación de datos electrofisiológicos en tiempo real. Se utilizó un amplificador no inversor (LM324) con un valor de ganancia de 5V, para amplificar la señal adquirida. Se realizaron mediciones electrofisiológicas mediante sondas conectadas a la planta y al amplificador. Los datos se procesaron y visualizaron utilizando un Arduino Uno, aprovechando los puertos analógicos y la resolución de conversión analógica a digital (ADC) de 10 bits del Arduino. El artículo presenta los resultados de la exposición de la planta a tres factores ambientales: luz solar, sombra y riego. Se observaron respuestas físico eléctricas distintas en cada caso, con cambios en el voltaje de salida registrado. Este enfoque de monitoreo proporciona información valiosa sobre cómo la cactácea responde a diferentes estímulos, lo que puede ser fundamental para optimizar su crecimiento y conservación.

**Palabras clave:** Físico eléctrica, Arduino, Amplificador.

#### Abstract

Plants constantly interact with their environment and respond to biological and environmental stimuli. This article focuses on the study of cactus, an endemic cactus known for its medicinal properties. The plant responds to factors such as light, humidity, and nutrient availability through changes in its physio electric response. To enhance the understanding of these interactions, a monitoring system is proposed that allows real-time collection of electrophysiological data. An inverting amplifier (LM324) with a gain value of 5V was used to amplify the acquired signal from cactus. Electrophysiological measurements were taken using probes connected to the plant and the amplifier. The data was processed and displayed using an Arduino Uno, taking advantage of the Arduino's analog ports and its 10-bit analog-to-digital conversion (ADC) resolution. The article presents results from exposing the plant to three environmental factors: sunlight, shade, and watering. Different physio electric responses were observed in each case, with changes in the recorded output voltage. This monitoring approach provides valuable information on how cactus responds to different stimuli, which can be crucial for optimizing its growth and conservation.

**Keywords:** physio electric, Arduino, amplifier.

## INTRODUCCIÓN

Durante décadas, se ha investigado acerca de la señal eléctrica que generan las plantas. En la literatura existe una amplia información acerca del tipo de señal eléctrica en plantas, su generación y propagación (Ndung'u et al., 2021). Las señales eléctricas en plantas son generadas por un desequilibrio en las concentraciones de iones. Las plantas también pueden generar señales mecánicas o químicas, con la finalidad de transmitir información (Vetcha, 2021). En la literatura se reporta que las señales eléctricas son importantes para varias actividades fisiológicas de las plantas, como lo es la fotosíntesis. La respuesta eléctrica de las plantas a los estímulos ambientales puede medirse y relacionarse cuantitativamente con la intensidad de la fuente estimulante, como la radiación solar, el contenido de agua del suelo, las tasas de evapotranspiración, flujo de savia, etc. (Ríos-Rojas et al., 2015). Estas relaciones pueden utilizarse para evaluar la influencia de diferentes situaciones ambientales, por ejemplo, en la disponibilidad de agua para las plantas. La importancia de la señal eléctrica en plantas radica en que por medio de esta es posible analizar el estrés hídrico que se genera en plantas a razón de sequedad en el suelo.

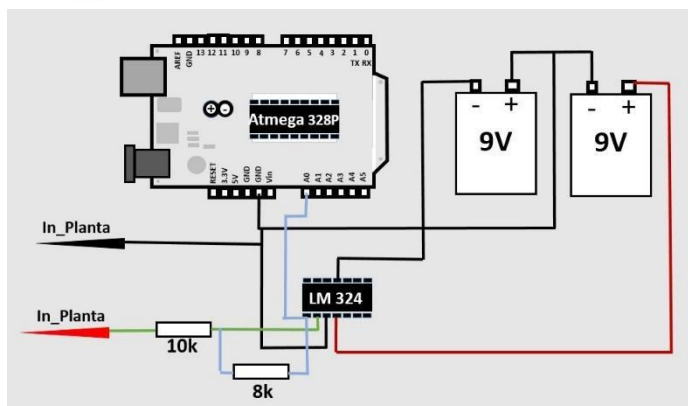
Por tanto, los cambios en variables ambientales generan modificaciones en la señal eléctrica, la cual se genera en el sitio de estimulación (Volkov, 2000; Volkov et al., 2004). Por otro lado, la señal eléctrica que genera una planta puede ser útil como sensor robusto para traducir información compleja del medio ambiente, considerando las plantas como sistemas de monitoreo (Cadosch, 2011). Debido a que las plantas constantemente recopilan información de su entorno, generando diversas respuestas biológicas. Las células, tejidos y órganos de las plantas tienen la capacidad de excitarse en respuesta a factores ambientales, lo que sincroniza sus funciones internas con su entorno. Esta sincronización se basa en estímulos externos relacionados con la excitabilidad de las células vegetales (Bruce et al., 2002; Pickaad, 1973).

La comprensión y gestión de los procesos biológicos en cualquier entorno se han vuelto esenciales, no sólo para mejorar la eficiencia de producción, sino también para contribuir a la conservación de las especies y reducir los impactos ambientales negativos. En este artículo, se explora la respuesta eléctrica de una cactácea; además de monitorear el control de la temperatura y la humedad, el seguimiento detallado de estas variables biológicas no solo mejora el rendimiento, sino que también abre nuevas oportunidades para la investigación e innovación en el campo de la agricultura. La cactácea empleada es endémica de las zonas desérticas del norte de México y sur de los Estados

Unidos. Se trata de una planta bien conocida por sus propiedades enteógenas y empleo como planta medicinal. Contiene más de 55 alcaloides aislados hasta la fecha, siendo la mezcalina el componente principal. Asimismo, algunas de las moléculas que produce esta planta tienen interés desde el punto de vista farmacológico. Como consecuencia de dicha demanda y de la excesiva recolección, esta especie está catalogada como especie en riesgo de extinción (Clavijo González, 2018). Para tener una mejor comprensión de las interacciones en las cactáceas y su entorno, es fundamental implementar un sistema de monitoreo que vaya más allá de las respuestas físicas a los cambios ambientales. Se debe comprender cómo los estímulos ambientales influyen en la respuesta fisiológica de esta variante biológica. La justificación para este enfoque radica en la importancia de comprender cómo la planta responde a una variedad de estímulos, lo que permite ajustar y optimizar las condiciones ambientales, como la temperatura, la humedad y la calidad del suelo, para lograr un óptimo crecimiento de la cactácea.

Al recopilar datos, se obtiene información valiosa para abordar los desafíos relacionados con el cuidado y la preservación de la especie. El sistema de monitoreo que se plantea usar será basado en la tarjeta de adquisición de datos Arduino, la cual es básicamente el control del sistema de monitoreo (Bajer et al., (2015). Dicha tarjeta es ampliamente utilizada (Guzmán-Fernández et al., 2012). Por ejemplo, sistemas para reconocer el llanto de bebés (Schubert et al., 2013), un sistema de reconocimiento para ADN (Kim et al., 2017), cámaras de bajo costo para el estudio del comportamiento animal (Devarakonda et al., 2016), para controlar la temperatura en invernaderos (Guzmán et al., 2019), e inclusive sistemas para aplicaciones en la física (Bueno-Hernández et al., 2017), entre otros (Wen-Hsuan et al., 2016; Carrera-Escobedo et al., 2019; Guzmán-Valdivia et al., 2021).

El objetivo de este trabajo es implementar un sistema de monitoreo que permita la recopilación de datos electrofisiológicos para analizar el comportamiento de esta variable biológica frente a diversos factores ambientales. Esto se logrará mediante el desarrollo de sensores que recopilan información electrofisiológica del ejemplar biológico en tiempo real, lo que proporciona datos que reflejan la respuesta electrofisiológica de la cactácea ante diferentes estímulos ambientales luminosos, como cambios en la humedad, la temperatura y el sustrato.

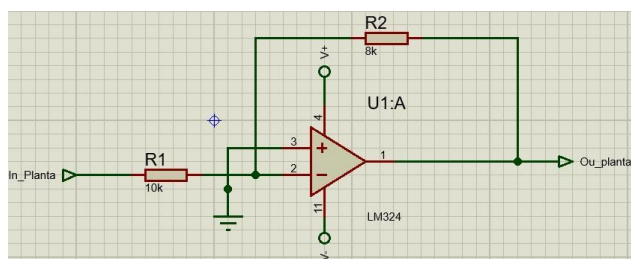


## MATERIALES Y MÉTODOS

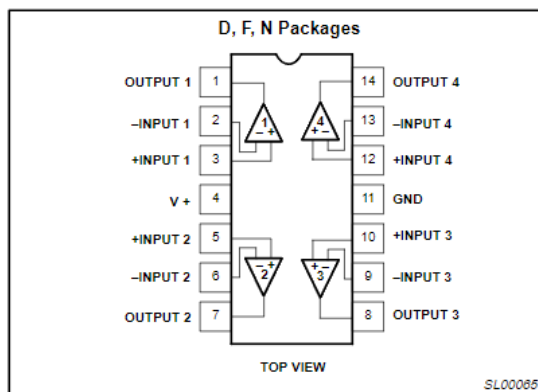
Para poder determinar la respuesta físico eléctrica de la cactácea, es importante determinar la salida de la señal de la especie, cómo el cambio de voltaje influye al ser expuesta a distintos factores ambientales como la luz solar directa, sombra y estrés hídrico. Para eso se determinó el uso de un amplificador no inversor que permite amplificar la señal adquirida por la cactácea donde con un arreglo de resistencia y un amplificador operacional Lm324 (Fig. 1; Fig. 2), que fue calculado en base a una ganancia de 5V ya que el arduino en una entrada analógica puede tomar valores de 0 a 5 volts. Por lo que la ganancia que se eligió de esa manera y tomando arbitrariamente el valor de R1 con la siguiente fórmula de ganancia (Ec. 1) despejando R2 podemos determinar su valor (Ec. 2).

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_3} \quad (\text{Ec } 1).$$

$$R_2 = \frac{(A-1)R_1}{A} \quad (\text{Ec } 2).$$



**Figura 1.** Esquema de circuito amplificador de señal.



**Figura 2.** Esquema de conexión del amplificador operacional LM324N.

Se tiene como resultado que R2 resulta de 8 Kohm, alimentando el amplificador operacional (Fig. 2) con fuente dual de +/- 9V que realizar con baterías alcalinas. Para la extracción de las señales electrofisiológicas de la especie se diseñaron dos sondas con agujas previamente esterilizadas y cable que permite la adquisición de datos donde se conectan a la planta y a la entrada de nuestro amplificador.

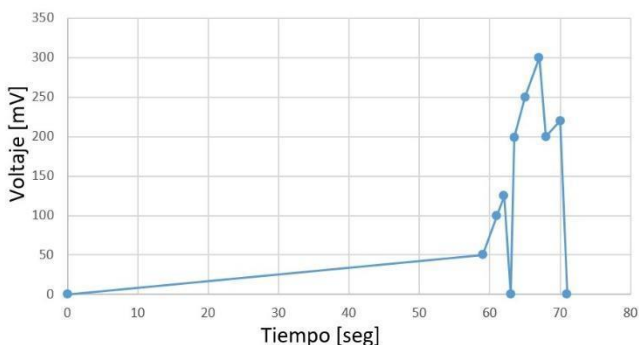
Para el procesado y visualización de los datos obtenidos se utilizó un Arduino Uno, tomando en cuenta los puertos analógicos ya que se tiene que aprovechar la tecnología de arduino al tener ADC integrado en estos puertos. Para poder interpretar la señal en un puerto analógico de arduino en términos de voltaje se debe comprender la resolución de conversión analógico a digital (ADC) del arduino.

El Arduino típico tiene un ADC de 10 bits, lo que significa que puede representar valores de voltaje en un rango de 0 a 5 voltios (la tensión de referencia predeterminada) con una resolución de 1024 pasos ( $2^{10}$ ). Para convertir el valor leído por el puerto analógico en voltaje se aplica la fórmula de voltaje (Ec 3).

$$\text{Voltaje} = \frac{\text{valor inicial}}{1023} (\text{Tensión de referencia}) \quad (\text{Ec } 3).$$

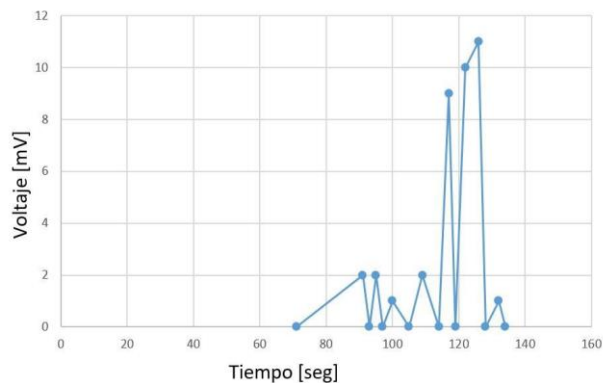
## RESULTADOS Y DISCUSION

La especie por analizar se expuso a tres factores ambientales: luz solar, sombra y exceso de agua donde podemos observar como la respuesta electrofisiológica de la especie es distinta en los tres factores a los que se expuso. En la Figura 3 se puede apreciar como la exposición a la luz solar, al ser expuesta en los primeros 10 segundos de contacto con la luz directa del sol, a una temperatura ambiente de 23°C, adquiriendo datos de hasta 300 que convirtiendo a voltaje tenemos una tensión de 1.46mV.



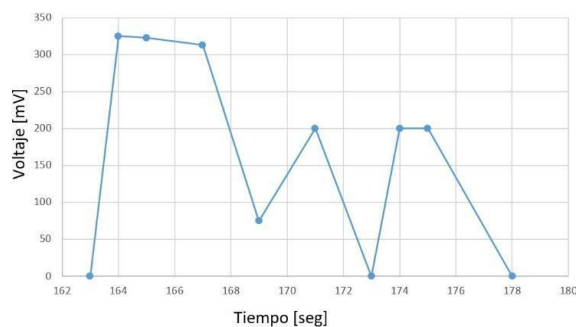
**Figura 3.** Cactácea expuesta a luz.

Al colocar la cactácea en sombra con temperatura de 19 °C los resultados que se pueden ver en la figura 5, se vieron alterados comparando con la lectura anterior (Fig. 4) lo que permite concluir que los factores ambientales a los que la estamos exponiendo son motivo para que esta arroje un cambio significativo en su respuesta eléctrica, dando como valor pico de 0.058mV en un periodo de 24 segundos. El tiempo que transcurrió para ver una lectura al cambiarlo de sol a sombra fue de 82 segundos de la última lectura en sol a la primera lectura en sombra como se puede ver en la Figura 4, el valor pico alcanzado fue de 0.053mV. Podemos determinar ese valor de voltaje gracias a la conversión de la ecuación 3.



**Figura 4.** Cactácea expuesta a la sombra.

Cuando se comenzó a suministrar agua a la cactácea el valor analógico se dispara a valores por encima de los 300, manteniendo como se puede ver en la Figura 5, valores altos que realizando la conversión da como resultado un valor pico de voltaje de 1.66mV; lo que hace notar que su respuesta al agua es mayor que al exponerla a la luz solar como se ve en la Figura 5.



**Figura 5.** Cactácea expuesta a exceso de agua.

## CONCLUSIONES

El estudio de la respuesta electrofisiológica de la cactácea ante estímulos ambientales como luz, sombra y riego reveló cambios significativos en su actividad eléctrica. El uso de un sistema de monitoreo basado en un amplificador no inversor y un Arduino Uno permitió registrar estos cambios con precisión. Los resultados obtenidos demostraron que la planta mostró respuestas eléctricas distintas ante diferentes condiciones ambientales. La exposición a la luz solar, la sombra y el exceso de agua generaron variaciones notables en el voltaje registrado. Por ejemplo, la luz solar produjo un pico de 1.46mV, mientras que la sombra y el riego mostraron valores menores de 0.058mV y 1.66mV respectivamente. Estos hallazgos son fundamentales para comprender cómo

factores como la luz, la humedad y otros estímulos influyen en la actividad electrofisiológica de la planta. Esta comprensión puede ser crucial para optimizar el crecimiento y la conservación de la cactácea, una especie en riesgo de extinción debido a la recolección excesiva.

## REFERENCIAS

- Bajer L, Krejcar O (2015) Design and realization of low cost control for green house environment with remote control. *IFAC-Papers On Line* 48(4):368–373. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.07.062>
- Bueno-Hernández D, Rupesh K, Roberto M, Marty JL (2017). Low cost optical device for detection of fluorescence from Ochratoxin A using a CMOS sensor. *Sensors Actuators B* 246:606–614. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.02.097>
- Bruce, R., Johnson, R. A., Wytenbach, R., Wayne, R., & Ronald, R. (2002). Action Potentials in a Giant Algal Cell: A Comparative Approach to Mechanisms and Evolution of Excitability. *The Journal of Undergraduate Neuroscience Education*, 1(1), 22-29.
- Cadosch, D., P. -T. Huang, D. D. Damian, S. Miyashita, A. Aoyama and R. Pfeifer. (2011). "Attempt on plant machine interface," *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 791-796, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/ICSMC.2011.6083749>
- Carrera-Escobedo Jose L., Guzman-Valdivia Cesar H., Ortiz-Rivera A., Garcia-Ruiz M. & Cruz-Dominguez O. (2019). Quantitative assesment of the improvement of the drying process by increasing the turbulence level. *Thermal Science* 2019 Volume 23, Issue 2 Part B, Pages: 953-963. <https://doi.org/10.2298/TSC1170509189C>
- Clavijo González, N. (2018). "Etnobotánica de *Lophophora williamsii*." Trabajo Fin de Grado inédito, Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Devarakonda K, Nguyen KP, Kravitz AV (2016) ROBucket: a low cost operant chamber based on the Arduino microcontroller. *Behav Res Methods* 48:503–509. <https://doi.org/10.3758/s13428-015-0603-2>
- Fuentes Martínez, N., Rodríguez Abdala, V., Ortiz Esquivel, D., Ortega Sigala, J., Sifuentes Gallardo, C., Cleva, M., Cruz Domínguez, O. (2023). "Determinación de la Respuesta Electrofisiológica de lenteja en pastizales utilizando Arduino." *Congreso Internacional De Manejo de Pastizales*, Tomo 2, 82-83.
- Guzmán-Fernández, M., Zambrano de la Torre, M., Ortega-Sigala, J. et al. (2021). Arduino: a Novel Solution to the Problem of High-Cost Experimental Equipment in Higher Education. *Exp Tech* 45, 613–625. <https://doi.org/10.1007/s40799-021-00449-1>
- Guzmán-Valdivia, C.H.; Madrigal-López, O.; Désiga-Orenday, O.; Blanco-Ortega, A.; Berumen-Torres, J.A.; Gómez-Becerra, F.A. (2021). Design, Development and Control of a Therapeutic Robot Incorporating Aquatic Therapy for Ankle Rehabilitation. *Machines*, 9, 254. <https://doi.org/10.3390/machines9110254>
- Guzmán C, Carrera J, Berumen J, Ortiz A, Guirette O, Arroyo A, Brizuela J (2019). Implementation of virtual sensors for monitoring temperature in greenhouses using CFD and control. *Sensors* 19(1):60. <https://doi.org/10.3390/s19010060>
- Kim K-W, Lee M-S, Ryu M-H, Kim J-W (2016). Arduino-based automation of a DNA extraction system. *Technol Health Care* 24: 105–112. <https://doi.org/10.3233/THC-151048>
- Ríos-Rojas, Liliana. (2014). Electrophysiological assessment of water stress in fruit-bearing woody plants. *Journal of Plant Physiology* 171 (2014) 799–806. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2014.02.005>
- Ndung'u Ruth Wairimu, Kamweru Paul Kuria, Kirwa Abraham Tuwe. (2021). Action and variation potential electrical signals in higher plants. *African Journal of Biological Sciences*. <https://doi.org/10.33472/AFJBS.3.1.2021.1-18>
- Pickaard, B. G. (1973). Action potentials in higher plants. *The Botanical Review*, 39(2), Washington University, St. Louis, Missouri.
- Schubert T, D'Ausilio A, Canto R (2013). Using Arduino microcontroller boards to measure response latencies. *Behav Res Methods* 45:1332–1346. <https://doi.org/10.3758/s13428-013-0336-z>
- Vetcha Satya Lalitha Samhita. (2021). A Review on Plant Signal Processing. *7th International Conference on Advanced Computing & Communication Systems (ICACCS)*. 978-1-6654-0521-8 ©2021 IEEE
- Volkov, A. G. (2000). Green plants: electrochemical interfaces. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 483(1-2), 150-156.
- Volkov, A. G., Dunkley, T. C., Morgan, S. A., Ruff II, D., Boyce, Y. L. and Labady, A. J. (2004). Bioelectrochemical signaling in green plants induced by photosensory systems. *Bioelectrochemistry*, 63(1-2), 91-94.
- Wen-Hsuan K, Chi-Hung T, Sufen C, Ching-Chang W (2016). Development of a computer-assisted instrumentation curriculum for physics students: using LabVIEW and Arduino Platform. *J Sci Educ Technol* 25:427. <https://doi.org/10.1007/s10956-016-9603-y>