





Tecnología Inclusiva en Química: Validación de un pH-metro Parlante Arduino

Inclusive Technology in Chemistry: Validation of an Arduino Talking pH Meter

Cisne-Altamirano J. I.¹, Escoto-López H. E.¹, Salgado-Cisne A. A.¹, Mondragón-Molina M. E.¹

-  Cisne-Altamirano J. I.
jorge.cisne@ct.unanleon.edu.ni
-  Escoto-López H. E.
hescoto@ct.unanleon.edu.ni
-  Salgado-Cisne A. A.
Albertosalgado059@gmail.com
-  Mondragón-Molina M. E.
maite.mondragon16@est.unanleon.edu.ni

*Autor de correspondencia: jorge.cisne@ct.unanleon.edu.ni

¹ Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua – León, Nicaragua,
Área de Conocimiento de Ciencia y Tecnología.

Universitas (León)

Universitas (León) Revista científica de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León.

ISSN-e: 2311-6072

Periodicidad: Semestral

vol.17, núm.2, 2025

luis.blanco@cm.unanleon.edu.ni

Recepción: 03 de Septiembre 2025

Aprobación: 09 de Abril 2026

URL: <https://revistas.unanleon.edu.ni/index.php/revistauniversita/article/view/1220>

DOI: <https://doi.org/10.5377/10.5377/ul.v17i2.22542>

Copyright © 2025 Revista Universitas (León): Revista Científica de la UNAN León. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua León. (UNAN-León). Dirección Académica. Departamento de Investigación. Unidad de Publicaciones y Eventos Científicos.



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución No Comercial Compartir Igual 4.0

Resumen:

El presente estudio muestra el montaje y diseño de un pH-metro parlante en la plataforma Arduino, con el objetivo de promover la inclusión en laboratorios de química para estudiantes con condición visual. El equipo utiliza un módulo pH-4502C, un electrodo E201-BNC y un sensor de temperatura DS18B20, montados en una placa de desarrollo Arduino Uno. Se implementó un sistema de audio con parlantes para comunicar las mediciones de pH y temperatura de manera simultánea, facilitando de esta manera la inclusión de los estudiantes que presentan condición visual. Se evaluó el desempeño del equipo basado en Arduino con respecto al pH-metro comercial Orion Star A111 mediante análisis de calibración, regresión lineal ponderada y pruebas ANOVA con soluciones buffer de pH 4.00, 7.00 y 10.00. Los resultados mostraron una muy buena linealidad ($r^2 > 0.998$), con pendientes de -59.03 mV/pH (Arduino) y -58.6 mV/pH (A111), y eficiencias de 99.78% y 99.39%, respectivamente. Las pruebas estadísticas no muestran diferencias significativas entre ambos equipos ($F_{cal} < F_{tab}$), aunque se detectó mayor dispersión en las lecturas del sistema Arduino en condiciones alcalinas, atribuible a la resolución ADC y ausencia de compensación automática de temperatura. Sin embargo, el prototipo cumple con los requisitos de precisión para fines académicos, representando una alternativa viable, accesible e inclusiva para el desarrollo de competencias experimentales en entornos educativos inclusivos.

Palabras claves: Arduino, pH, temperatura, discapacidad visual, educación inclusive

Abstract:

The present study shows the assembly and design of a talking pH meter on the Arduino platform, with the aim of promoting inclusion in chemistry laboratories for students with visual impairments. The equipment uses a pH-4502C module, an E201-BNC electrode, and a DS18B20 temperature sensor, mounted on an Arduino Uno development board. An audio system with speakers was implemented to communicate pH and temperature measurements simultaneously, thus facilitating the inclusion of visually impaired students. The performance of the Arduino-based equipment was evaluated with respect to the Orion Star A111 commercial pH meter through calibration analysis, weighted linear regression, and ANOVA tests with pH 4.00, 7.00, and 10.00 buffer solutions. The results showed very good linearity ($r^2 > 0.998$), with slopes of -59.03 mV/pH (Arduino) and -58.6 mV/pH (A111), and efficiencies of 99.78% and 99.39%, respectively. Statistical tests show no significant differences between both devices ($F_{cal} < F_{tab}$), although greater dispersion was detected in the readings of the Arduino system in alkaline conditions, attributable to the ADC resolution and absence of automatic temperature compensation. However, the prototype meets the accuracy requirements for academic purposes, representing a viable, accessible, and inclusive alternative for the development of experimental skills in inclusive educational environments.

Keywords: Arduino, pH, temperature, visual disability, inclusive education

Introducción

La educación inclusiva constituye un principio fundamental que busca garantizar que todos los estudiantes tengan las mismas oportunidades, sin importar sus habilidades o limitaciones. Este concepto fue establecido por la UNESCO en 1994 y, aunque en la actualidad sigue siendo relevante, su implementación no siempre es adecuada, especialmente en áreas como la educación científica, y más específicamente en los laboratorios de química, donde existen retos pendientes por superar UNESCO (1994).

La química es una ciencia predominantemente visual, orientada a la observación y manipulación tangible. Numerosas actividades prácticas dependen de representaciones visuales de fenómenos físicos y químicos, como cambios de color, formación de precipitados, técnicas de cromatografía o el uso de espectrofotómetros que miden parámetros basándose en la interacción de las sustancias con la luz (Merino Rubilar et al., 2014). Por consiguiente, la vista juega un papel crucial, especialmente en los laboratorios docentes.

Esto complica la inclusión de estudiantes con condición visual en clases prácticas, ya que muchas actividades están diseñadas considerando únicamente a quienes poseen visión completa. Esta situación genera inquietudes entre los profesores sobre cómo involucrar realmente a personas con visión parcial o nula, sin marginarlas o realizar adaptaciones superficiales que no permitan una integración cognitiva.

Los laboratorios de química se utilizan para actividades experimentales que requieren precisión, movilidad y percepción sensorial; es decir, se debe observar, medir, tocar e interpretar cambios en tiempo real (Shaban, 2024). Sin embargo, las personas con discapacidades encuentran barreras en estos espacios debido a la falta de infraestructura y tecnologías adecuadas para su uso universal. Herramientas como el pH-metro y los termómetros son fundamentales en cualquier laboratorio de química para medir la acidez, basicidad y temperatura de una solución. No obstante, estos equipos normalmente carecen de adaptaciones para estudiantes con discapacidad visual, lo cual dificulta su participación directa.

Además, estos instrumentos requieren una calibración correcta para ofrecer resultados confiables, relacionando el potencial eléctrico medido en milivoltios con los valores reales de pH mediante soluciones buffer conocidas (pH 4.00, 7.00 y 10.00), asegurando así que los datos sean trazables, exactos y precisos (Ortiz et al., 2009). Actualmente, existen opciones basadas en tecnologías accesibles y económicas como Arduino, una plataforma de hardware y software libre que permite construir dispositivos electrónicos sencillos, personalizables y de bajo costo (Guerrero Salazar, 2023). Esta herramienta ha ganado popularidad en la educación STEM por sus siglas en inglés (Science, Technology, Engineering and Mathematics) por ser fácil de usar, versátil y adaptable (Jimenez Leon et al., 2021), desarrollándose aplicaciones para laboratorios de química que sirven desde la recolección de datos hasta la automatización de procesos (Kubínová & Šlégr, 2015).

Considerando lo anterior, surge la idea de diseñar un pH-metro parlante con sensor de temperatura basado en Arduino. Este dispositivo permitiría a personas con discapacidad visual realizar mediciones de pH y temperatura de manera autónoma en los laboratorios de química, facilitando su inclusión en entornos educativos que normalmente presentan barreras físicas y tecnológicas.

Diseño metodológico, materiales y métodos

Se llevó a cabo una investigación cuantitativa, con nivel de estudio descriptivo de corte transversal. El objetivo es su implementación en sesiones de laboratorio inclusivas para estudiantes con discapacidad visual.

El trabajo se realizó en el Laboratorio de Energías Renovables del Área de Conocimiento de Química de la UNAN-León. Se utilizó el programa Arduino IDE versión 2.3.4 para la programación del sketch, el software Fritzing versión 1.0.4 para la elaboración del diagrama de conexión de los componentes, un sensor de temperatura DS18B20 (Marca Maxim Integrated), un módulo pH-4502C y un electrodo E201-BNC (Marca OEM). Asimismo, se implementó una pantalla OLED 128x32 píxeles. El equipo incluye dos parlantes de 4 Ω diseñados para operar simultáneamente, lo que permite una mejor distribución de la señal de audio y un uso más eficiente de la energía.

Se realizaron mediciones de pH de soluciones buffer Fisher Scientific (pH 4.00, 7.00 y 10.00) a una temperatura de 27 °C, utilizando un baño termostático Vidra FOC BT-9 y una unidad refrigerante Vidra FOC UR-1. Se utilizó un electrodo de vidrio combinado con plata/cloruro de plata durante 4 días consecutivos. El objetivo fue comparar la sensibilidad, repetibilidad, reproducibilidad y confiabilidad de los resultados del equipo diseñado con base en Arduino frente a un equipo de laboratorio comercial, para su uso por personas con discapacidad visual.

Se procedió a verificar la calibración del pH-metro comercial Orion Star A111 y del pH-metro con base en Arduino. Una vez verificado el funcionamiento correcto del sistema, se conectaron el electrodo de vidrio y el de referencia. Ambos se introdujeron en una solución tampón con pH 7.00, mantenida a una temperatura constante de 25 °C, con una precisión de ± 0.1 °C, asegurando condiciones estables durante la medición. Bajo estas condiciones, se registraron los valores de potencial en milivoltios.

A continuación, se repitió el mismo procedimiento utilizando soluciones patrón con pH 4.00 y 10.00. En cada caso, se realizaron cinco mediciones independientes del potencial eléctrico para garantizar la confiabilidad y reproducibilidad de los datos. Para confirmar la calibración del sistema, se llevaron a cabo mediciones directas de pH utilizando nuevamente las soluciones tampón. A partir de los datos recolectados, se generó el modelo de calibración electroquímica, permitiendo calcular la pendiente y el punto de intersección (intercepto) de la recta de calibración, parámetros fundamentales para evaluar el desempeño del sistema.

Asimismo, se realizaron lecturas de pH de las soluciones buffer a una temperatura de 25 °C durante 5 días consecutivos, realizando 5 réplicas por día. Se evaluó la repetibilidad usando el test de Bartlett, ANOVA de un factor y cartas de control de las lecturas realizadas.

Resultados y Discusión

Para la correcta utilización de cualquier equipo de medición, siempre debe verificarse su calibración; esto significa confirmar las características técnicas declaradas por el fabricante. Para el pH-metro Orion Star A111, el fabricante declara que el punto isopotencial debe ser 0.00 mV cuando se selecciona un pH 7.00, y deben registrarse valores de potencial de ± 90 mV para una desviación de 1.5 inferior o superior al valor de pH de referencia (6.50 y 8.50).

Por otro lado, para el pH-metro con base en Arduino, el fabricante del módulo pH-4502C declara un isopotencial de 0.0 mV cuando el pH es 7.00, una precisión de 0.02 pH y una resistencia interna menor a 250 M Ω (Unit Electronics, s.f.).

A continuación, se presenta el circuito electrónico simplificado de un medidor de pH convencional (Figura 1), según Skoog et al. (2017).

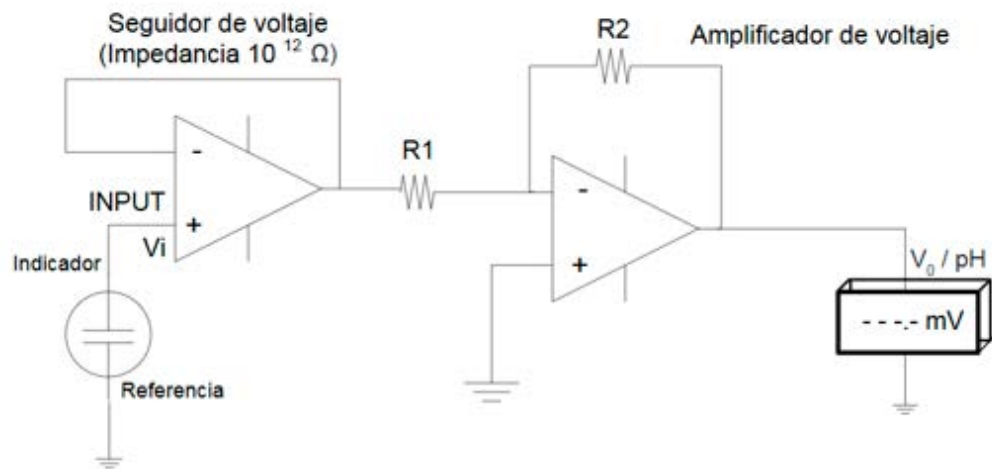


Figura 1. Circuito electrónico simplificado de un pH-metro convencional

Para el caso del pH-metro parlante con base en tecnología Arduino, se dispone de los siguientes componentes, mostrados en un diagrama simplificado realizado en el programa Fritzing V.1.0.4 (Figura 2):

1. Sensor de temperatura DS18B20
2. Puerto de carga tipo C de 5 V
3. Resistencia de 4.7 O
4. Pulsador (Botón rojo)
5. Arduino Uno (placa principal)
6. Condensador de 220 μ F (Electrolítico)
7. Condensador de 100 nF (Cerámico)
8. Amplificador PAM 8303
9. Módulo de voz talkie o bocina (Pequeño parlante redondo)
10. Protoboard
11. Pantalla OLED 0.96" (Pequeño display negro)
12. Módulo de pH con electrodo (Placa verde con conector E201-BNC)

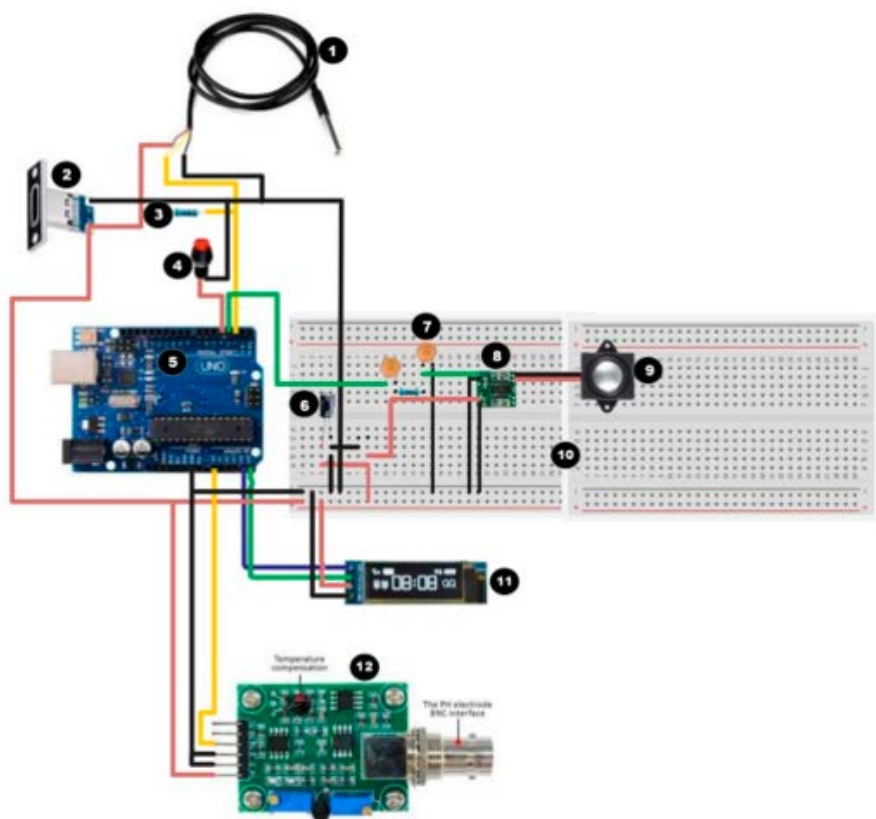


Figura 2. Diseño y montaje del dispositivo para medir pH a base Arduino (fritzing V.1.0.4.)

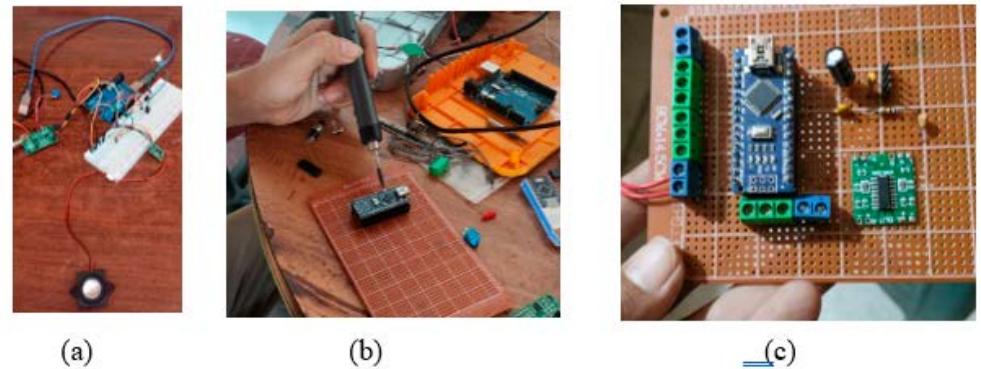


Figura 3. (a) Prototipo inicial en protoboard, (b) Proceso de soldadura y ensamblaje, (c) Circuito final montado

En la Figura 3 se presentan el prototipo inicial en protoboard, el proceso de soldadura y ensamblaje, y el circuito final montado.

Los pH-metros se diseñan para registrar valores de potencial en mV de aproximadamente 177 mV a un pH de 4.00, 0 voltios a pH 7.00 y -177 mV a pH 10.00. La ecuación matemática que sustenta esto es la ecuación de Nernst (Ec.1):

$$E_v = - (RT / F) (1000) \ln(10)(\text{pH}-7) \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

E_v : es el potencial medido en milivoltios

$R=8.31441 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$

$F=96484.56 \text{ Cmol}^{-1}$

$T= (273.15+t \text{ } ^\circ\text{C}) \text{ K}$

En correspondencia con la ecuación 1, a 25 $^\circ\text{C}$ se obtiene una pendiente de -59.16 mV/pH y un intercepto de 414.1 mV. Por consiguiente, es importante verificar el cumplimiento de estos parámetros para evaluar la eficiencia del electrodo del equipo propuesto con base en Arduino.

Con la finalidad de estudiar el desempeño tanto del pH-metro A111 como del de base Arduino, se analizó la precisión de las respuestas de potencial proporcionadas por ambos equipos. Se realizaron mediciones utilizando soluciones tampón de pH 4.00, 7.00 y 10.00, las cuales se muestran en la Tabla 1. y en la Fig 4

Tabla 1. Resultados de la verificación de los valores de potencial de acuerdo a los valores teóricos establecidos.

pH	Potencial E (mV)		Parámetros de calibración
	Teórico	Arduino	
4.00	+177	+168	$S \approx -59.16 \text{ mV/pH}$ (Nernst) $E^0 \text{ teórico} = 413 \text{ mV}$ Ajuste lineal excelente
7.00	0	+4	
10.00	-177	-186	
Pendiente (mV/pH)	-59.0	-59.0	
Intercepto (mV)	413	408.3	
R²	1.000	0.998	
Error vs. Teórico	—	2.80%	<5% aceptable para prototipos

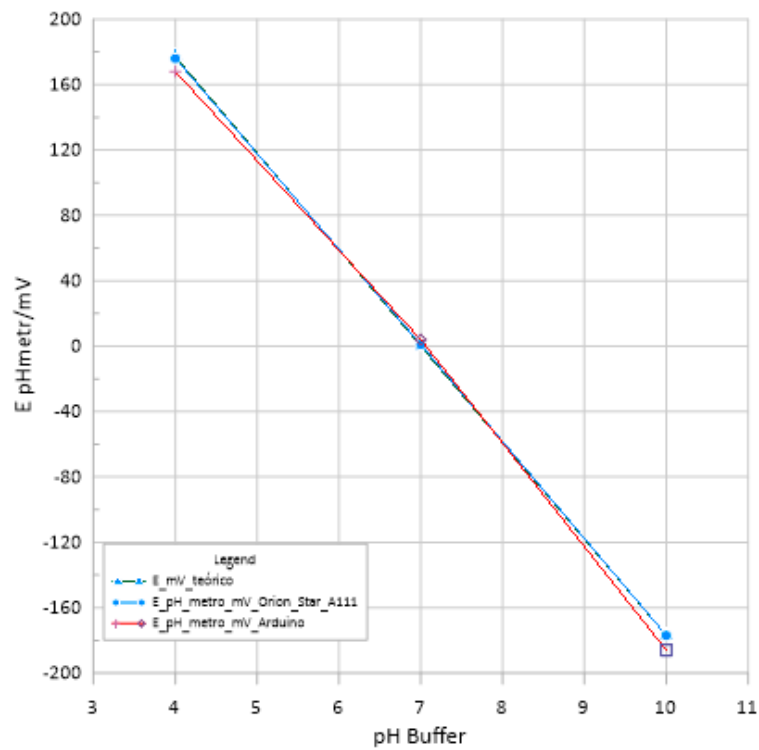


Figura 4. Curva de calibración verificación de parámetros de desempeño del electrodo.

Se puede apreciar en la [Tabla 1](#) que en ambos electrodos se obtienen buenas respuestas de potencial de acuerdo con lo establecido por el fabricante. Sin embargo, se observó un pequeño cambio en las respuestas del pH-metro con base en Arduino, lo cual puede relacionarse con los efectos de la temperatura en el desempeño del electrodo. Este factor puede afectar tanto la pendiente de respuesta del sensor como el equilibrio ácido-base de la solución analizada. Los equipos profesionales como el Orion Star A111 compensan este efecto mediante sensores de temperatura integrados, de los cuales carece el sistema propuesto (Arduino), debiendo ser programado manualmente. Asimismo, el sistema Arduino posee otras particularidades que provocan estas pequeñas desviaciones, como la resolución de la señal al convertirla de analógica a digital (utilizan ADC de 10 bits), lo cual limita la medición del voltaje traduciéndose en imprecisiones en la escala de pH ([Qutieshat et al., 2019](#)). Estas imprecisiones se ven reflejadas en la variación de la pendiente observada en la [Figura 4](#); dicha variación puede deberse también al ruido eléctrico y señal de fondo que afectan la medición del pH, señales muy pequeñas del orden de mV susceptibles a esto sin un filtrado adecuado ([Mohamed et al., 2023](#)).

Calibración del sistema potenciométrico

La calibración del sistema potenciométrico se llevó a cabo utilizando un electrodo combinado de pH, tanto para el pHmetro Orion Star A111 como para el módulo pH-4502C conectado a una tarjeta Arduino. Para lo cual, se usaron soluciones tampón con valores de pH de 4.00, 7.00 y 10.00. Los datos obtenidos durante el proceso de calibración se resumen en la [Tabla 2](#) y [Tabla 3](#).

Tabla 2. Valores de las lecturas de potenciales para las soluciones buffer 4.00, 7.00 y 10.00

E pHmetro/mV Orion Star A111							
pH Buffer	E 1	E 2	E 3	E 4	E 5	Promedio	S ²
4	176	176	175	176	177	176	0.71
7	1	1	1	0	1	0.8	0.45
10	-177	-177	-175	-177	-176	-176.4	0.89

Tabla 3. Valores de las lecturas de potenciales para las soluciones buffer 4.00, 7.00 y 10.00

E pHmetro/mV Arduino							
pH Buffer	E 1	E 2	E 3	E 4	E 5	Promedio	S ²
4	168	169	170	168	169	168.8	0.84
7	3	4	3	4	4	3.6	0.55
10	-186	-185	-186	-186	-184	-185.4	0.89

Para el análisis de ambos resultados se realizó un análisis de regresión lineal ponderada (ARLP) o WLR (Weighted Linear Regression por sus siglas en inglés), la regresión lineal ponderada asume que todas las mediciones experimentales tienen la misma varianza es decir que son homocedasticas, no obstante, en las mediciones electroquímicas como las del pH las incertidumbres varían en todo el rango de calibración y por lo general aumenta a pH extremos debido a factores tales como el error alcalinos variación de en el potencial de unión líquida entre otros ([Li & He, 2023](#)), ([Kitsos & Kolovos, 2010](#))

El análisis de regresión lineal ponderada (ARLP), realizado mediante el método de mínimos cuadrados, aplicado a los datos obtenidos tanto del pHmetro Orion Star A111 como del sistema basado en Arduino, se presenta en la [Tabla 4](#)

Tabla 4. Resultados de análisis de regresión para electrodos del pH-metro A111 y el Arduino

Parámetro	Orion Star A111	Arduino
Pendiente (b1)	-58.6	-59.03
S(b1)	0.19	2.29
Intercepto (b0)	412.2	408.9
S(b0)	0.99	16.9
Var. Residual (Sx/y)²	0.66	94.4
r²	0.99998179	0.99849726

Si bien es cierto se observa una buena linealidad en la respuesta del electrodo de ambos equipos 99.99 % y 99.84 % para el A111 y el pH-metro Arduino de igual manera, se constata una ligera desviación en el valor de la pendiente de los dos equipos en comparación con el valor teórico esperado. Para verificar la hipótesis de que las pendientes deben ser iguales a la teórica se utiliza el test estadístico Z ([Brereton, 2018](#))

$$-1.96 < Z_c = \frac{b_1 - \beta_1}{S_{b1}} < 1.96 \quad (\text{Ec.2})$$

Donde b_1 corresponde a la pendiente experimental y β_1 corresponde a la pendiente teórica (-59.16), se evaluó para cada electrodo de acuerdo con los resultados obtenidos, no se observan diferencias estadísticamente significativas entre los valores de pendiente teórica y experimental. El valor de Z_c calculado para el equipo Orion Star A111 fue de 1.89, mientras que para el sistema basado en Arduino fue de 0.057. Como se muestra, ambos valores se encuentran dentro del rango establecido por la ecuación (2), lo cual respalda la aceptación de la hipótesis nula, por lo tanto, se puede concluir que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores de pendiente teórica y experimental obtenidos.

Así mismo podemos calcular la eficiencia del electrodo a través de la siguiente ecuación:

$$P_{25\%} = \frac{b_1}{\beta_1} \cdot 100 \quad (\text{Ec.3})$$

Los resultados obtenidos indican que la eficiencia del electrodo Orion Star A111 alcanza un valor de 99.39 %, mientras que el sistema basado en Arduino presenta una eficiencia ligeramente superior, con un valor de 99.78 %. Si bien ninguno de los dos sistemas alcanza el 100 % de eficiencia ideal, ambos demuestran un desempeño altamente aceptable dentro del rango esperado para aplicaciones analíticas rutinarias. Esta diferencia en la eficiencia ligeramente mayor, se puede deber a que el del A111, ya tiene mayor tiempo de uso con respecto al de base Arduino que es nuevo, La eficiencia del electrodo combinado de vidrio disminuye progresivamente con el uso prolongado, evidenciándose Esta variación en los valores de la pendiente puede deberse a varios factores, como el envejecimiento de la membrana de vidrio, la contaminación o bloqueo parcial de la unión líquida, así como al agotamiento gradual del electrolito interno (Bard & Faulkner, 2001)

Prueba de Análisis de Varianza de un Factor (ANOVA)

Se realizó una prueba ANOVA entre el pH-Metro Orion Star A111 y el pH-metro basado en Arduino, mediante lecturas de soluciones buffers pH 4.01, 7.00 y 10.01.

H0: $F_{tab} > F_{cal}$ “Hipótesis nula”

H1: $F_{cal} > F_{tab}$ “Hipótesis alternativa”

El análisis de varianza de un factor (ANOVA) realizado tiene como objetivo determinar si existen diferencias significativas entre las mediciones de pH obtenidas con dos dispositivos diferentes: uno de uso estándar en el laboratorio y otro basado en tecnología Arduino. Se realizaron mediciones con soluciones buffer Thermo Fisher Scientific de pH 4.01 ± 0.1 , 7.00 ± 0.01 y 10.01 ± 0.02 a 25°C , durante cuatro días consecutivos.

Como propuesta de hipótesis se consideró como hipótesis nula (H_0) que no existen diferencias significativas entre los dispositivos, lo que supone que los valores de F calculado (F_{cal}) deben ser menores que los valores críticos o de la tabla (F_{tab}). La hipótesis alternativa (H_1) indica que existen diferencias significativas entre los dispositivos si F_{cal} es mayor que F_{tab} .

Tabla 5. Valores de F_{tab} y F_{cal} de soluciones buffer

Buffer	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4
pH 4.01	2.98	3.52	0.05	0.80
pH 7.00	3.06	0.03	3.57	1.89
pH 10.01	0.08	3.55	0.90	3.33

Los resultados muestran que para la solución buffer de pH 4.01, en todos los días de medición los valores de F_{cal} fueron menores a F_{tab} , con valores de 2.98, 3.52, 0.05 y 0.8 respectivamente, contra el valor crítico constante de 4.00. (Tabla 5) Esto propone que no existen diferencias significativas entre los dispositivos en la medición a este rango de pH, lo que respalda la hipótesis nula.

Para la solución buffer de pH 7.00 se notó un comportamiento similar, ya que los valores de F_{cal} en los días de medición fueron 3.06, 0.03, 3.57 y 1.89, todos por debajo de F_{tab} . En los días 1 y 3 el F_{cal} se acercó al valor crítico, sin embargo, no se superó en ningún caso, lo que señala que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los dispositivos de medición para este rango de pH.

En la solución buffer de pH 10.01 se registraron valores de F_{cal} de 0.08, 3.55, 0.90 y 3.33, que reiteradamente se encuentran por debajo de F_{tab} , cuyo valor constante es 4.00. Así como en las soluciones buffer de pH 4.01 y pH 7.00, los valores obtenidos para F_{cal} no sobrepasan el valor crítico en ninguno de los casos, por lo cual no existen diferencias estadísticamente significativas entre los dispositivos de medición, en consecuencia, no existe evidencia para rechazar la hipótesis nula.

Considerando que para todas las soluciones buffer evaluadas los valores de F_{cal} permanecieron por debajo de F_{tab} , se concluye que no existen diferencias significativas entre el pH-metro Orion Star A111 y el pH-metro basado en tecnología Arduino. Esto demuestra que el dispositivo basado en Arduino puede considerarse una alternativa aceptable, para la medición de pH, proporcionando resultados congruentes contra los de un equipo estándar de laboratorio.

Comparación del comportamiento de las respuestas del Orion Star A111 y el pH-metro base Arduino

En el análisis comparativo de desempeño entre dos sistemas de medición de pH, como un pHmetro comercial (Orion Star A111) y uno basado en Arduino, el gráfico de probabilidad normal permite evaluar la normalidad de los residuos generados tras el ajuste de modelos de calibración. Esta herramienta es fundamental para validar los supuestos estadísticos detrás de métodos paramétricos utilizados comúnmente en quimiometría, como la regresión lineal ponderada (Slutsky, 1998); (Ortiz et al., 2009).

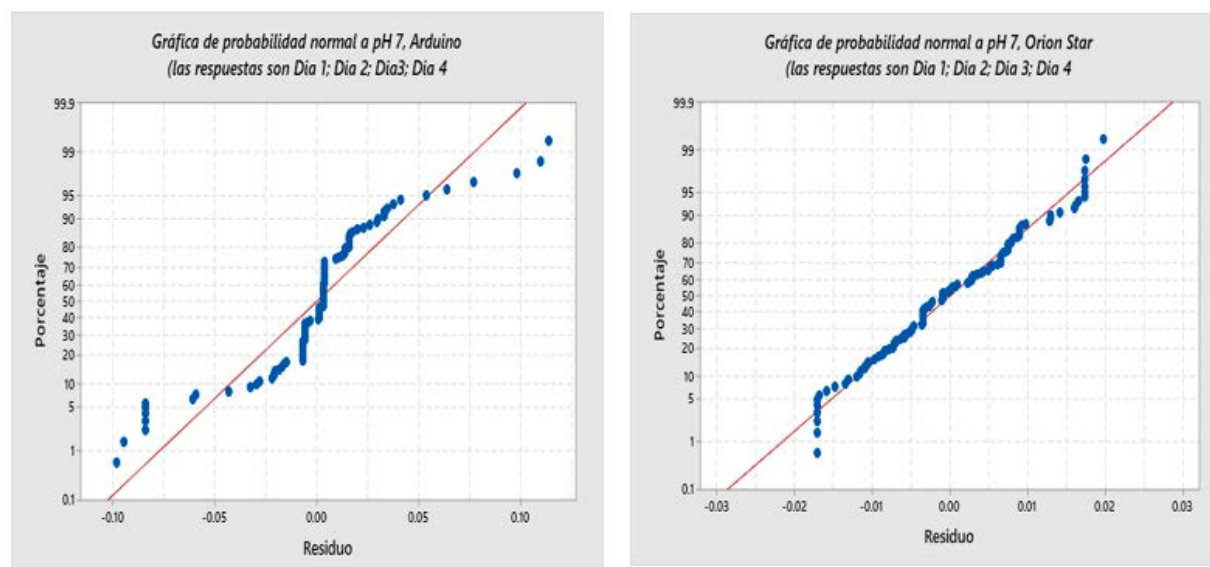


Figura 5. Comportamiento de las lecturas de pH de un buffer 4.01 ± 0.01 del pHmetro A111 y el de base Arduino durante cuatro días consecutivos

La Figura 5 presenta en el eje de las x residuos, que representa las diferencias entre los valores experimentales y los teóricos (pH4.01), en el eje de las y es el porcentaje o la distribución acumulada de los residuos, en el gráfico se observa que la mayoría de los puntos siguen una tendencia relativamente cercana a la línea de tendencia, lo cual advierte que los residuos siguen una distribución aproximadamente normal, en general los puntos no presentan curvaturas ni desviaciones significativas a la línea de tendencia, no obstante hay algunos puntos principalmente hacia los extremos (superior e inferior) que se alejan ligeramente de la línea esto podrían deberse a algunas desviaciones de índole aleatorias y algún sesgo en las mediciones y no causadas por errores sistemáticos lo cual refuerza la confiabilidad de las mediciones realizadas con el pH-metro de base Arduino. En cambio, en pH-metro comercial se muestra una distribución de los puntos casi perfecta con los puntos alineados a la línea de tendencia, aunque existen al igual que el pHmetro Arduino algunas desviaciones en los extremos de las curvas estos no son significativos el test de Shapiro-Wilk aplicado a ambos casos muestra tanto para el A111 el de base Arduino valores de 0.94 y 0.15 respectivamente

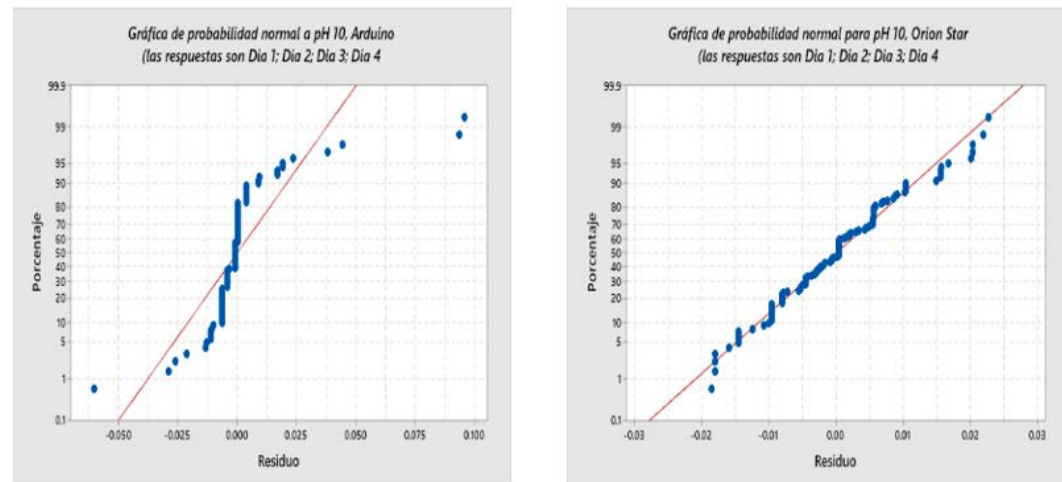


Figura 7. Comportamiento de las lecturas de pH de un buffer 10.01 ± 0.01 del pH-metro A111 y el de base Arduino durante cuatro días consecutivos

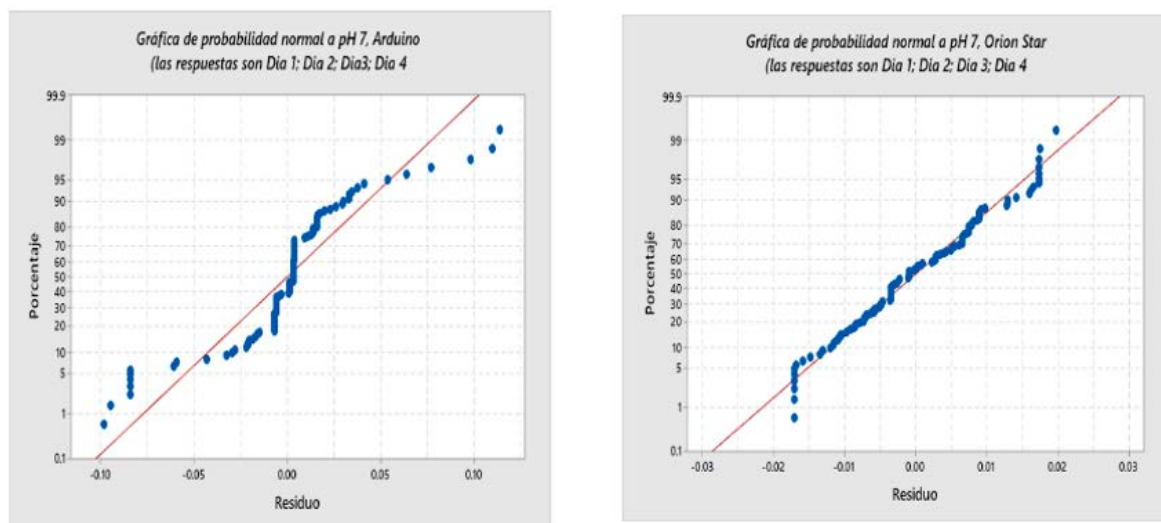


Figura 6. Comportamiento de las lecturas de pH de un buffer 7.01 ± 0.01 del pH-metro A111 y el de base Arduino durante cuatro días consecutivos

En el rango de pH 10, el pH-metro basado en Arduino presenta mayores dificultades para obtener mediciones precisas debido a la menor cantidad de iones H^+ en solución (Figura 7). En el Orion Star, los residuos se encuentran entre -0.02 y 0.02 , indicando una distribución bastante alineada con la normalidad. Sin embargo, en el Arduino, los residuos varían de -0.025 a 0.025 , lo que muestra una mayor dispersión en sus mediciones. Esto evidencia que el sensor de pH del Arduino tiene más dificultades para estabilizar las mediciones en soluciones alcalinas, lo que podría deberse a una menor sensibilidad del electrodo en este rango. Además, las variaciones en el voltaje de alimentación del Arduino pueden introducir ruido en la señal, esto indica que sus valores tienden a fluctuar más en comparación con el Orion Star. El test de Shapiro-Wilk aplicado a ambos casos muestra tanto para el A111 el de base Arduino valores de 0.24 y 0.078 respectivamente

Para el rango de pH 7, en la Figura 6 correspondiente al **pH-metro Orion Star**, los residuos se encuentran dentro de un rango reducido de -0.02 a 0.02 , indicando una simetría y una buena alineación con la distribución normal en las mediciones. Por otro lado, el **pH-metro basado en Arduino** presenta residuos de -0.10 hasta 0.05 , lo que refleja una mayor dispersión en sus valores de pH medidos a lo largo de los 4 días. Esta diferencia propone que, aunque ambos dispositivos siguen una tendencia relativamente normal, el Orion Star mantiene una mayor repetibilidad en sus mediciones. La mayor dispersión del Arduino puede deberse a la sensibilidad o interferencias eléctricas, ya que las mediciones se realizaron con ambos electrodos sumergidos en la solución a un mismo tiempo. El test de Shapiro-Wilk aplicado a ambos casos muestra tanto para el A111 el de base Arduino valores de **0.64** y **0.099** respectivamente. Estos resultados confirman que ambos sistemas cumplen con los supuestos de normalidad necesarios para aplicar métodos estadísticos paramétricos, aunque el **pH-metro** comercial (Orion Star A111) muestra un desempeño más consistente desde el punto de vista estadístico, sin embargo el pH-metro de base Arduino cumpliría su función para uso desde el punto de vista académico.

El desarrollo de un dispositivo para medir pH basado en Arduino demostró ser una alternativa viable alternativa para laboratorios inclusivos con desempeños comparables a equipos de uso tradicional en los laboratorios como el pH-metro Orion Star A111. Los análisis de regresión lineal ponderada muestran una pendientes de -58.6 mV/pH (A111) y -59.03 mV/pH (Arduino), con eficiencias del 99.39% y 99.78%, respectivamente, validando la linealidad teórica ($r^2 > 0.998$). La aplicación de análisis de varianza de un factor ANOVA muestra que no existen diferencias significativas ($F_{cal} < F_{tab}$) en mediciones de buffers (pH 4.01, 7.00, 10.01), respaldado por residuos normalmente distribuidos (Shapiro-Wilk: $p > 0.05$), no obstante pH-metro Arduino presento mayor dispersión en pH alcalinos (± 0.025 unidades) esto debido a limitaciones de resolución ADC (10bits) y ruido electrónico, sin embargo su precisión cumple con los requisitos académicos. Estos resultados avalan la viabilidad técnica del dispositivo como herramienta educativa inclusiva con potencial de mejora mediante el empleo de filtros para depreciación del ruido electrónico para mejorar la señal y compensación automática de la temperatura para disminuir aún más los errores en la medición de pH.

Referencias Bibliográficas

- Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications* (2nd ed.). Wiley.
- Brereton, R. G. (2018). *Chemometrics: Data Driven Extraction for Science* (2nd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118904688>
- Guerrero Salazar, L. (2023). Aplicación con software y hardware libre Arduino como eje facilitador del aprendizaje de competencias STEM. *Academia y Virtualidad*, 16(1), 69-88. <https://doi.org/10.18359/ravi.5900>
- Jimenez Leon, R., Magaña Medina, D. E., & Aquino Zúñiga, S. P. (2021). Gestión de tendencias STEM en educación superior y su impacto en la industria 4.0. *Journal of the Academy*, 5, 99-121. <https://doi.org/10.47058/joa5.7>
- Kitsos, C., & Kolovos, K. (2010). An optimal calibration design for ph meters. *Instrumentation Science & Technology*, 38, 436-447. <https://doi.org/10.1080/10739149.2010.514158>
- Kubínová, Š., & Šlégr, J. (2015). ChemDuino: Adapting Arduino for Low-Cost Chemical Measurements in Lecture and Laboratory. *Journal of Chemical Education*, 92(10), 1751-1753. <https://doi.org/10.1021/ed5008102>
- Li, J., & He, Z. (2023). Study on Calibration Method for Ion Concentration Measurement Parameters of Ion Selective Electrode Based on Multiple Linear Regression. *Academic Journal of Science and Technology*, 4, 195-201. <https://doi.org/10.54097/ajst.v4i3.5069>
- Merino Rubilar, C., Arellano, M., & Adúriz-Bravo, A. (2014). *Avances en didáctica de la química: Modelos y lenguajes*.
- Mohamed, C., Belaout, A., & Ramdane, K. (2023). *An Arduino-based Water Quality Monitoring System using pH, Temperature, Turbidity, and TDS Sensors*.
- Ortiz, M., Sarabia, L., Sánchez, M., & Herrero, A. (2009). 1.02. Quality of Analytical Measurements: Statistical Methods for Internal Validation. En *Comprehensive Chemometrics* (Vol. 1, pp. 17-76). <https://doi.org/10.1016/B978-044452701-1.00090-9>
- PH-4502C Sensor de PH Liquido con electrodo E201C-BNC. (s. f.). *UNIT Electronics*. Recuperado 23 de junio de 2025, de <https://uelectronics.com/producto/sensor-de-ph-liquido/>
- Qutieshat, A., Aouididi, R., & Arfaoui, R. (2019). Design and Construction of a Low-Cost Arduino-Based pH Sensor for the Visually Impaired Using Universal pH Paper. *Journal of Chemical Education*, 96(10), 2333-2338. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00450>
- Shaban, S. A. (2024). A Smart System for the University Chemical Laboratory Using IoT. *Journal of Advances in Information Technology*, 15(1), 104-117. <https://doi.org/10.12720/jait.15.1.104-117>
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & West, D. M. (2017). *Principios de analisis instrumental* (7.a ed.). Cengage Learning.
- Slutsky, B. (1998). Handbook of Chemometrics and Qualimetrics: Part A By D. L. Massart, B. G. M. Vandeginste, L. M. C. Buydens, S. De Jong, P. J. Lewi, and J. Smeyers-Verbeke. Data Handling in Science and Technology Volume 20A. Elsevier: Amsterdam. 1997. Xvii + 867 pp. ISBN 0-444-89724-0. \$293.25. *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, 38(6), 1254-1254. <https://doi.org/10.1021/ci980427d>
- UNESCO. (1994). *Informe final de la Conferencia Mundial sobre Necesidades Educativas Especiales: Acceso y Calidad*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. https://www.unesco.org/legacy/archive/media/files/salamanca_statement_spanish.pdf