

**FORTALECIMIENTO DE LAS HABILIDADES DE PENSAMIENTO CRÍTICO:
INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE PROBLEMAS, MEDIANTE EL
MODELO INTEGRADO THINKING CLASSROOM Y LAS 7E PARA LA
ENSEÑANZA DE LA POTENCIOMETRÍA ÁCIDO-BASE EN EL SOFTWARE
TITRACURVE**

**DANIEL STEVEN BUENHOMBRE NUÑEZ
NERINDER XIOMARA LÓPEZ GARCÍA**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
MAESTRÍA EN DOCENCIA DE LA QUÍMICA
BOGOTÁ, D.C, COLOMBIA**

2026

**FORTALECIMIENTO DE LAS HABILIDADES DE PENSAMIENTO CRÍTICO:
INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE PROBLEMAS, MEDIANTE EL
MODELO INTEGRADO THINKING CLASSROOM Y LAS 7E PARA LA
ENSEÑANZA DE LA POTENCIOMETRÍA ÁCIDO-BASE EN EL SOFTWARE
TITRACURVE**

**DANIEL STEVEN BUENHOMBRE NUÑEZ
NERINDER XIOMARA LÓPEZ GARCÍA**

Trabajo de grado para optar por el título de Magister en Docencia de la Química

GRUPO DE INVESTIGACIÓN

Didáctica y sus ciencias

LINEA DE INVESTIGACIÓN

Interdisciplinariedad y química en contexto: una perspectiva experimental en la
didáctica de la química

DIRECTOR

Diego Alexander Blanco Martínez

Magister en Ciencias-Química

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
MAESTRÍA EN DOCENCIA DE LA QUÍMICA
BOGOTÁ, D.C, COLOMBIA**

2026

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, queremos agradecer a Dios por guiarnos en cada etapa de este camino y por brindarnos la fortaleza, la sabiduría y la oportunidad de culminar este arduo e importante trabajo.

De manera especial, expresamos nuestra profunda gratitud a nuestro director de trabajo de grado, Diego Alexander Blanco Martínez, por su permanente acompañamiento, orientación y dedicación. Su experiencia, sus valiosas observaciones y sus constantes aportes fueron fundamentales para el desarrollo y la culminación satisfactoria de esta investigación.

Asimismo, agradecemos a las docentes Martha Alix Novoa Galeano y Leidy Gabriela Ariza Ariza, quienes, en calidad de evaluadoras, acompañaron este proceso con paciencia, profesionalismo y compromiso. Sus valiosas observaciones, sugerencias y retroalimentaciones enriquecieron significativamente este trabajo y contribuyeron a fortalecer su calidad académica.

Agradecemos también a los futuros docentes de química que participaron en el taller “Construcción de curvas de titulación potenciométricas ácido-base mediante una interfaz analógica-digital con Arduino Uno y la integración del software interactivo TitrCurve”, por su disposición, compromiso y colaboración, que hicieron posible el desarrollo y la implementación de este proyecto investigativo.

Expresamos nuestro sincero agradecimiento al ingeniero de sistemas Jean Mahecha Ramírez por su orientación y valioso apoyo en el diseño y desarrollo del Software TitrCurve, cuya contribución fue fundamental para la consolidación de esta investigación.

Finalmente, expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad Pedagógica Nacional por abrirnos nuevamente sus puertas y brindarnos un espacio de formación crecimiento académico y desarrollo profesional. Nos sentimos profundamente agradecidos por la oportunidad de cursar nuestra maestría en esta institución, que continúa formando educadores comprometidos con la transformación de la enseñanza y la construcción de una educación de calidad para las nuevas generaciones.

DEDICATORIA

Al culminar esta importante etapa de mi formación profesional, quiero expresar mi más profunda gratitud a quienes hicieron posible este logro. Cada aprendizaje, cada desafío superado y cada meta alcanzada han estado acompañados por el amor, la confianza y el apoyo de personas que han sido fundamentales en mi vida. A ellas dedico con todo mi corazón este trabajo. A Dios, por ser la luz que ha guiado cada uno de mis pasos, por fortalecer mi espíritu en los momentos de dificultad y por concederme la sabiduría, la fortaleza y la perseverancia necesarias para alcanzar esta meta. A mis padres, Ruth Núñez y Carlos Buenhombre, quienes, con su amor incondicional, esfuerzo y sacrificio me enseñaron que los sueños se alcanzan con dedicación y constancia. Gracias por creer en mí, por ser mi mayor ejemplo y por brindarme las herramientas para construir mi futuro. Este logro también les pertenece, porque sin ustedes nada de esto habría sido posible. A Xiomara López, por convertirse en mi mayor refugio durante este proceso. Gracias por estar presente en cada momento, por tu paciencia infinita, por comprender mis ausencias, celebrar mis logros y sostenerme cuando las dificultades parecían superar mis fuerzas. Tu amor ha sido una de las razones que me impulsó a seguir adelante, y hoy comparto contigo la alegría de alcanzar esta meta, porque has sido parte esencial de este camino.

Daniel Steven Buenhombre Núñez.

Este trabajo representa más que la culminación de una etapa académica; es el resultado de esfuerzos, perseverancia y del apoyo incondicional de las personas que han estado conmigo en este camino. Por ello, lo dedico con profundo cariño a quienes han sido fundamentales en mi vida y en mi formación personal y profesional. A la memoria de mi abuelo, Nepomuceno López, por su amor incondicional y por dejarme como legado el valor de la constancia, la humildad y la fortaleza. Esta meta es una promesa cumplida que lleva su recuerdo y su ejemplo siempre presente. A mi abuela, Rosa García, por ser mi refugio y mi apoyo constante, por creer en mí incluso en los momentos difíciles y por acompañarme con su amor incondicional en cada paso de este proceso. A mi mamá, Enith López, por haberme impulsado a salir adelante y apoyarme en mi crecimiento profesional. A ella mi más profunda admiración y gratitud. A mi compañero de vida, Daniel Buenhombre, por su apoyo incondicional, su paciencia y por caminar conmigo en este proceso. Gracias por creer en mí, porque también es un logro que hemos construido juntos.

Nerinder Xiomara López García.

INDICE DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	10
2.	FORMULACIÓN Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	12
3.	OBJETIVOS	12
3.1.	Objetivo General	14
3.2.	Objetivos Específicos	14
4.	JUSTIFICACIÓN	14
5.	ANTECEDENTES	16
5.1.	Habilidades de Pensamiento Crítico	16
5.2.	Modelo integrado del Thinking Classroom y las 7E	19
5.3.	Potenciometría Ácido-Base y la implementación del software Arduino IDE	21
6	MARCO REFERENCIAL	23
6.1.	Pensamiento Crítico	23
6.2.	Habilidades de Pensamiento Crítico	24
6.3.	Modelo Integrado Thinking Classroom	26
6.4.	Modelo de las 7E	28
6.5.	Taxonomía SOLO	30
6.6.	Fundamento de la potenciometría	31
6.7.	Potenciometría ácido-base	31
6.6	Arduino IDE	32
6.7	Python	33
6.10.	Implementación de Arduino en potenciometría ácido-base	34
7	MARCO METODOLÓGICO	35
7.1.	Enfoque de investigación	36
7.2.	Participantes	36
7.3.	Fases de la investigación	36
7.4.	Fase de inicio: Fundamentación teórica y reconocimiento de las habilidades de pensamiento crítico	37
7.4.1.	Levantamiento documental	37
7.4.2.	Aplicación Test de Halpern	38
7.4.3.	Fase de desarrollo: Diseño y construcción experimental del Software TitraCurve como interfaz del sistema medidor de pH.	38

7.4.4. Diseño, construcción y aplicación del Software TitraCurve	39
7.4.5. Módulo 1. Fundamentación conceptual de la potenciometría ácido-base.....	40
7.4.6. Modulo 2. Entorno físico electrónico	41
7.4.7. Diseño del circuito electrónico	42
7.4.8. Conexión y funcionamiento analógica-digital.....	44
7.4.9. Modulo 3. Entorno computacional y digital.....	48
7.4.10. Programación en Arduino IDE	48
7.4.11. Reconocimiento del microcontrolador	51
7.4.12. Proceso de calibración.....	54
7.4.13. Curva de Calibración.....	57
7.4.14. Desarrollo del Software TitraCurve en Python	59
7.4.15. Arquitectura funcional software	60
7.4.16. Diseño de la interfaz gráfica.....	60
7.4.17. Representación gráfica de la curva de titulación.....	60
7.4.18. Almacenamiento y exportación de datos	61
7.4.19. Entorno computacional y cargue de librerías	61
7.4.20. Configuración de la comunicación serial	62
7.4.21. Recepción y lectura de datos	63
7.4.22. Almacenamiento de datos experimentales.....	63
7.4.23 Generación de la curva potenciométrica	64
7.4.24. Exportación automática de resultados experimentales.....	65
7.4.25. Modulo 4. Diseño del aplicativo para el análisis y procesamiento gráfico	66
7.4.26. Módulo 5. Aplicación experimental del Software TitraCurve.....	66
7.4.27. Elaboración de la secuencia didáctica	68
7.4.28. Actividad # 1: Comprendiendo la potenciometría ácido-base: Relaciones conceptuales y procesos de titulación.....	69
7.4.29. Actividad # 2: Exploremos en Tinkercad, una aproximación del sistema medidor de pH.	70
7.4.30. Práctica de laboratorio: Determinación potenciométrica de ácido fosfórico en bebidas cola mediante la integración del Software TitraCurve	71
7.4.31. Actividad # 3 Elaboración de una UVE heurística.....	71
7.5 Fase de finalización: Implementación y evaluación de la secuencia de actividades.	72
7.6 Criterios de calidad de la investigación.....	76

8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	81
8.1.	Fase de inicio: Aplicación Test de Halpern	81
8.1.1.	Sección A: Habilidad de interpretación	83
8.1.2.	Sección B: Habilidad de análisis de problemas.....	86
8.2.	Fase de desarrollo: Diseño y construcción experimental del Software TitraCurve como interfaz del sistema medidor de pH	92
8.3.	Fase de finalización: Implementación y evaluación de la secuencia de actividades. 109	
8.3.1.	Actividad # 1 Comprendo la potenciometría ácido-base: Relaciones conceptuales y procesos de titulación	109
8.3.2.	Actividad # 2: Exploremos en Tinkercad, una aproximación del sistema medidor de pH.	116
8.3.3.	Práctica de laboratorio: Determinación potenciométrica de ácido fosfórico en bebidas cola mediante la integración del Software TitraCurve.	123
8.3.4.	Actividad # 3 Elaboración de una UVE heurística	125
8.3.5.	Prueba de salida: Aplicación Test de Halpern.	134
8	CONCLUSIÓN	143
9	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	145
10	ANEXOS	149

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Declaración de consenso de expertos sobre las habilidades de pensamiento crítico interpretación y análisis.	25
Tabla 2.	Subcategorías de las habilidades de pensamiento crítico Interpretación y Análisis.	25
Tabla 3.	Estrategias seleccionadas del Thinking Classroom para el desarrollo del trabajo investigativo.	28
Tabla 4.	Estrategias del modelo de las 7E.	29
Tabla 5.	Descripción y función de los módulos del sistema.....	39
Tabla 6.	Componentes electrónicos del sistema medidor de pH.	41
Tabla 7.	Asignación de conexiones en el sistema medidor de pH.	45
Tabla 8.	Funciones principales del código Arduino.	49
Tabla 9.	Funciones principales del código programable en Arduino IDE.....	52

Tabla 10. Elementos de código programable en el entorno de Arduino IDE.	56
Tabla 11. Relación lineal entre milivoltios y cambios de pH	58
Tabla 12. Librerías y funciones ejecutables implementadas en Python.	59
Tabla 13. Componentes y funciones para la interfaz del Software TitrCurve.	60
Tabla 14. Variables y unidades visibles en la interfaz del Software TitrCurve.....	61
Tabla 15. Algoritmos de código programable en la arquitectura del Software TitrCurve.	65
Tabla 16. Estructuración de la secuencia didáctica	68
Tabla 17. Rúbrica evaluativa para la caracterización de las habilidades interpretación y análisis de problemas según los niveles de la Taxonomía SOLO.	74
Tabla 18. Metodología implementada en la investigación.	78
Tabla 19. Conexiones reales del entorno físico	96
Tabla 20. Resumen de resultados obtenidos	106

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Catorce estrategias del Thinking Classroom.	27
Figura 2. Representación niveles de la Taxonomía SOLO.....	30
Figura 3. Celda para determinaciones potenciométricas.	32
Figura 4. Placa de Arduino UNO	33
Figura 5. Circuito integrado.	35
Figura 6. Fases de la investigación.....	37
Figura 7. Esquema de un electrodo de vidrio combinado.	43
Figura 8. Representación gráfica de las conexiones del entorno físico interno.	45
Figura 9. Representación gráfica del electrodo y transmisor.	46
Figura 10. Representación gráfica de las conexiones del entorno físico externo.....	47
Figura 11. Entorno físico externo real.	47
Figura 12. Código fuente inicial.....	49
Figura 13. Interfaz de ejecución en Arduino IDE.....	49
Figura 14. Librería instalada en Arduino IDE para medición de pH.....	50
Figura 15. Curva de calibración ideal de pH a 25,0 °C.	57
Figura 16. Código base de librerías instalables en Python.	62
Figura 17. Fragmento de código programable para la conexión serial.	62

Figura 18. Fragmento de código programable para la conexión interna y externa del sistema.	63
Figura 19. Fragmento de código para el almacenamiento de datos experimentales.	64
Figura 20. Fragmento de código para proporcionar curva de titulación.	64
Figura 21. Fragmento de código programable para exportar resultados.	65
Figura 22 Esquema general de la aplicación experimental de TitraCurve.	67
Figura 23. Metodología pirámide de alcance	82
Figura 24. Pirámide de alcance habilidad de interpretación, Test de Halpern.	86
Figura 25. Pirámide de alcance habilidad de análisis, Test de Halpern.....	90
Figura 26. Esquema general de la arquitectura y componentes del sistema TitraCurve.	92
Figura 27. Esquema de análisis del módulo 1.	94
Figura 28. Diagrama de flujo operacional del sistema medidor de pH	95
Figura 29. Esquema de análisis del módulo 2.	97
Figura 30. Esquema de análisis del módulo 3.	99
Figura 31. Esquema completo de la comunicación serial.	99
Figura 32. Interfaz principal del Software TitraCurve versión 2,50.....	100
Figura 33. Interfaz de la zona de trabajo del Software TitraCurve versión 2,50.....	101
Figura 34. Esquema de análisis del módulo 4.	102
Figura 35. Esquema de análisis del módulo 5.	105
Figura 36. Resumen de los datos tabulados del reporte obtenido de la determinación de ácido fosfórico en la muestra de Cola-Cola.....	106
Figura 37. Pirámide de alcance habilidad de interpretación, Actividad # 1.	111
Figura 38. Pirámide de alcance habilidad de análisis, Actividad # 1.	116
Figura 39. Pirámide de alcance habilidad de interpretación, Actividad # 2.	119
Figura 40. Pirámide de alcance habilidad de análisis, Actividad # 2.	122
Figura 41. Software TitraCurve en paralelo con el potenciómetro de referencia.....	123
Figura 42. UVE heurística PQF 14, grupo Coca-Cola.	127
Figura 43. UVE heurística PQF 12, grupo Pepsi-Cola.....	128
Figura 44. UVE heurística PQF 10, grupo Big-Cola.....	129
Figura 45. UVE heurística PQF 6, grupo Pow-Cola.	130
Figura 46. Pirámide de alcance habilidad de interpretación, Actividad # 3.	131
Figura 47. Pirámide de alcance habilidad de análisis, Actividad # 3.	134
Figura 48. Pirámide de alcance habilidad de interpretación, Prueba de salida.	138
Figura 49. Pirámide de alcance habilidad de análisis, Prueba de salida.....	141

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de habilidades de pensamiento crítico en la formación de profesores de química en formación (PQF) adquiere especial relevancia dentro de los procesos de enseñanza-aprendizaje debido a la necesidad de formar profesionales capaces de interpretar información, analizar situaciones problema y construir explicaciones sustentadas mediante criterios científicos y evidencias derivadas de diferentes contextos educativos y experimentales. Facione (2011) plantea que el pensamiento crítico corresponde a un juicio intencional y autorregulado que involucra habilidades como interpretación, análisis, evaluación e inferencia; desde una perspectiva complementaria, Halpern (2014) señala que estas habilidades adquieren sentido cuando son utilizadas para examinar situaciones, resolver problemas y sustentar decisiones fundamentadas en criterios científicos. Particularmente, la interpretación permite comprender y expresar significados a partir de diversas representaciones, mientras que el análisis favorece la identificación de relaciones entre datos experimentales, conceptos químicos y argumentos contruidos a partir de evidencias.

Dentro de este panorama, la potenciometría ácido-base constituye una técnica instrumental ampliamente utilizada en química analítica para el estudio del comportamiento de especies químicas mediante la medición de diferencias de potencial eléctrico asociadas a la actividad de los iones hidronio (H_3O^+) en una solución acuosa (Skoog et al., 2023). Su enseñanza involucra contenidos relacionados con el equilibrio ácido-base, procesos de estandarización y titulación, comportamiento de electrodos, soluciones amortiguadoras, construcción de curvas de titulación potenciométrica y zonas de pre-equivalencia, equivalencia y pos-equivalencia. La comprensión de estos contenidos requiere procesos que trascienden la identificación de conceptos y expresiones matemáticas e involucra la aplicación de criterios como la primera y segunda derivada, el análisis del comportamiento de las especies químicas implicadas en los diferentes equilibrios de los sistemas ácido-base y la relación entre las concentraciones analíticas molares obtenidas durante la ejecución de la técnica electroquímica.

Por su parte, Hofstein y Lunetta (2004) señalan que las actividades experimentales se consolidan como escenarios fundamentales dentro de la enseñanza de las ciencias porque posibilitan la construcción de conocimiento científico a partir de la interacción con fenómenos observables. En coherencia con esta postura, Seery (2020) plantea que el laboratorio debe consolidarse como un espacio orientado al aprendizaje de la química mediante procesos de observación, interpretación, análisis y construcción de explicaciones sustentadas en evidencias.

Los antecedentes abordados en esta investigación evidenciaron un creciente interés por la implementación de tecnologías abiertas (Open Source) o emergentes y sistemas de bajo costo aplicados a procesos educativos mediante el uso de plataformas basadas en Arduino. Estudios desarrollados por Arellano et al. (2022), Qutieshat et al. (2019) y trabajos nacionales como Aldana (2016) y Camargo et al. (s.f.) muestran que la integración entre sensores, sistemas de adquisición de datos y programación conforma una alternativa aplicable a procesos de enseñanza-aprendizaje en química. Los resultados

obtenidos en estas investigaciones destacan el potencial de dichas herramientas para promover actividades experimentales, favorecer procesos de interacción con fenómenos químicos y ampliar el acceso a recursos de laboratorio en contextos con limitaciones de materiales. Asimismo, entre los antecedentes consultados se encontraron estudios previos orientados al desarrollo de habilidades cognitivas y argumentativas mediante estrategias pedagógicas innovadoras, como el trabajo de Beltrán (2023), enfocado en la implementación integrada del modelo Thinking Classroom y las 7E (Enganchar, Elicitar, Explorar, Explicar, Elaborar, Evaluar y Extender) para fortalecer la habilidad argumentativa en la enseñanza de un concepto químico. No obstante, a partir de la revisión realizada, no se encontraron trabajos investigativos que integraran simultáneamente estas estrategias pedagógicas con el diseño de una herramienta tecnológica y educativa destinada a la construcción de curvas de titulación potenciométrica ácido-base en un grupo de profesores de química en formación (PQF).

A partir de estas consideraciones surge la presente investigación, cuyo propósito consistió en analizar los alcances del modelo integrado Thinking Classroom y las estrategias de las 7E en el fortalecimiento de habilidades de pensamiento crítico, específicamente la interpretación y el análisis de problemas, en un grupo de profesores de química en formación (PQF) de la Universidad Pedagógica Nacional, mediante la implementación de una secuencia de actividades asociada a la técnica potenciométrica ácido-base. Para ello, la propuesta incorporó el diseño, programación y construcción del Software TitrCurve, desarrollado a través del entorno de Arduino IDE y el lenguaje de programación Python integrado a un sistema medidor de pH basado en Arduino UNO. Esta herramienta tecnológica fue construida como un recurso o material educativo orientado al trabajo experimental y al análisis de información derivada de procesos de titulación, permitiendo registrar mediciones de pH in situ, representar gráficamente los resultados obtenidos y establecer relaciones entre el comportamiento químico observado y los principios teóricos asociados a la técnica electroquímica.

De acuerdo con estos parámetros, se estructuró el presente documento en cinco secciones principales. La primera sección aborda el problema de estudio, la pregunta orientadora, los objetivos y la justificación, considerando la necesidad educativa asociada a las habilidades de pensamiento crítico, específicamente aquellas relacionadas con la interpretación y el análisis de problemas en un grupo de profesores de química en formación (PQF). La segunda sección integra antecedentes y fundamentos conceptuales como el pensamiento crítico desde la perspectiva propuesta por Facione (2011), el modelo Thinking Classroom, entendido como una metodología pedagógica que favorece ambientes centrados en el razonamiento y la construcción colectiva de ideas (Liljedahl, 2021), las estrategias de las 7E como una secuencia de aprendizaje que promueve procesos de exploración y construcción de conocimiento (Eisenkraft, 2003), los fundamentos asociados a la potenciometría ácido-base y la incorporación de recursos o herramientas tecnológicas aplicadas en contextos experimentales en la enseñanza de las ciencias (Hofstein & Lunetta, 2004; Seery, 2020). La tercera sección reúne los aspectos metodológicos correspondientes al enfoque cualitativo de tipo exploratorio-descriptivo,

las fases implementadas, la adaptación del Test de Halpern, el diseño, programación y aplicación del Software TitrCurve mediante Arduino IDE y Python e integrado a un sistema medidor de pH basado en Arduino UNO, así como la utilización de la Taxonomía de SOLO propuesta por Biggs (2005) para el fortalecimiento de las habilidades de interpretación y análisis de problemas, la cual se apoyó de una rúbrica adaptada para el análisis y discusión de resultados. La cuarta sección reúne los hallazgos obtenidos a partir de la aplicación de la secuencia de actividades, la implementación del Software construido y las variables o elementos derivados del análisis realizado. Finalmente, la quinta sección integra las conclusiones construidas desde los objetivos planteados y los resultados obtenidos durante la investigación.

2. FORMULACIÓN Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

La presente investigación se fundamentó en la identificación de una brecha didáctica en la enseñanza de la química analítica instrumental, específicamente en la potenciometría ácido-base. En ese contexto, se describen a continuación las falencias observadas en la formación inicial de los PQF y se establecen los límites contextuales y conceptuales que enmarcan este estudio.

2.1 Planteamiento y alcance del problema

En la formación inicial de profesores de química, el desarrollo de habilidades asociadas al pensamiento crítico adquirió una importancia significativa debido a que la educación científica requiere procesos de enseñanza-aprendizaje que trasciendan la transmisión de contenidos y favorezcan el análisis, la interpretación y la comprensión de fenómenos científicos (Hofstein & Lunetta, 2004). Asimismo, Seery (2020) señaló la necesidad de transformar prácticas tradicionales de enseñanza mediante estrategias que promuevan una participación más activa y experiencias de aprendizaje contextualizadas. En este contexto, diversas investigaciones evidenciaron dificultades en el desempeño de los estudiantes acordes a las habilidades de pensamiento crítico, particularmente en procesos de análisis y comprensión de situaciones científicas aplicadas en entornos educativos de carácter experimental (Afikah et al., 2024). De igual manera, Dewi et al. (2025) señalaron que la implementación de estrategias fundamentadas en la participación activa y la resolución de problemas favoreció significativamente el fortalecimiento de estas habilidades.

Por otra parte, el estudio de fenómenos químicos como la potenciometría ácido-base exige la articulación de elementos conceptuales, matemáticos y experimentales, indispensables para el desarrollo de las competencias científicas relacionados con el equilibrio químico, interpretación de curvas de titulación y análisis de datos experimentales (Skoog et al., 2023). Su abordaje requiere que los PQF establezcan relaciones entre datos experimentales, representaciones gráficas y principios teóricos referentes al comportamiento de los sistemas ácido-base. Sin embargo, estos procesos suelen orientarse hacia la ejecución de procedimientos y la obtención de resultados experimentales, limitando oportunidades para desarrollar habilidades en función de la interpretación y el análisis de problemas (Pérez & Pérez, 2023).

En este contexto, se origina una necesidad educativa relacionada con la implementación de propuestas que integren componentes pedagógicos, disciplinares y tecnológicos capaces de promover escenarios de enseñanza-aprendizaje centrados en el razonamiento y la construcción de conocimiento científico a partir de evidencias experimentales. En respuesta a esta necesidad, la presente investigación propone una secuencia de actividades fundamentada en el modelo integrado Thinking Classroom propuesto por Liljedahl (2021) y las estrategias de las 7E planteadas por Eisenkraft (2003), articulada con el diseño, programación y construcción del Software TitraCurve, desarrollado mediante Arduino IDE y Python e integrado a un sistema medidor de pH basado en Arduino UNO, como un recurso tecnológico que favorece procesos de interacción y construcción activa del conocimiento en contextos experimentales de laboratorio para la enseñanza de la química (Seery, 2020).

Es importante señalar que la incorporación del Software TitraCurve dentro de la propuesta investigativa constituyó un elemento innovador debido a que fue creado como un material educativo dirigido a la construcción e interpretación de curvas de titulación potenciométrica ácido-base mediante el registro y representación gráfica de datos experimentales in situ. Su integración buscó fortalecer los procesos vinculados con la interpretación y análisis de información científica en los PQF, permitiendo establecer relaciones entre el comportamiento experimental observado y los fundamentos teóricos propios de la técnica instrumental.

La presente investigación se delimitó a la caracterización de las habilidades de pensamiento crítico correspondientes a interpretación y análisis de problemas en un grupo de 15 PQF de la Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional. El estudio se centró específicamente en contenidos relacionados con la potenciometría ácido-base y la construcción de curvas de titulación mediante una secuencia de actividades fundamentada en el modelo integrado Thinking Classroom y las estrategias de las 7E. Asimismo, la investigación incorporó el diseño, programación y construcción del Software TitraCurve, desarrollado mediante Arduino IDE y Python e integrado a un sistema medidor de pH basado en Arduino UNO, como material educativo orientado al registro, representación gráfica y análisis de datos experimentales asociados a diferentes sistemas ácido-base in situ. El fortalecimiento de las habilidades de interpretación y análisis de problemas se realizó mediante la implementación de un Test de Halpern adaptado y el análisis de los resultados se sustentó desde la Taxonomía SOLO propuesta por Biggs (2005), permitiendo identificar los alcances de la propuesta implementada en relación con la promoción de dichas habilidades.

Este estudio resultó significativo para la didáctica de la química al proporcionar un método novedoso que permitió ir más allá de superar la simple instrucción técnica del análisis instrumental para la ejecución de la potenciometría ácido-base. Para ello, se implementó una estrategia metodológica transferible que combina la experimentación en el laboratorio con el desarrollo del pensamiento crítico en la formación del profesorado. En función de lo expuesto se planteó la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo el modelo integrado Thinking Classroom y las estrategias de las 7E en una secuencia de actividades, fortalece las habilidades de pensamiento crítico, interpretación y análisis de problemas en un grupo de profesores en formación (PQF), al abordar la potenciometría ácido-base mediante un sistema medidor de pH basado en Arduino UNO y su integración con el Software TitraCurve?

3. OBJETIVOS

Se presentan en este apartado los objetivos de la presente investigación, los cuales establecen los lineamientos didácticos y metodológicos para la evaluación del impacto de estrategias innovadoras en la enseñanza de la química, con lo cual se busca relacionar el uso de herramientas tecnológicas accesibles con el desarrollo del pensamiento crítico.

3.1. Objetivo General

Analizar los alcances del modelo integrado Thinking Classroom y las estrategias de las 7E en el fortalecimiento de habilidades de pensamiento crítico, interpretación y análisis de problemas en un grupo de profesores de química en formación (PQF), mediante el uso de la técnica potenciométrica para la construcción de curvas de titulación ácido-base a través de un sistema medidor de pH basado en Arduino UNO y su integración con el Software TitraCurve.

3.2. Objetivos Específicos

- Identificar mediante la implementación de un test de Halpern adaptado, las habilidades de pensamiento crítico, interpretación y análisis de problemas en un grupo de profesores de química en formación (PQF).
- Establecer el diseño y programación del software TitraCurve, desarrollado en Arduino IDE y Python, integrado a un sistema medidor de pH basado en Arduino UNO, para la construcción de curvas de titulación de los equilibrios ácido-base, como material educativo que contribuya en el fortalecimiento de las habilidades de pensamiento crítico, interpretación y análisis de problemas en un grupo de profesores de química en formación (PQF).
- Determinar los alcances del modelo integrado Thinking Classroom y las estrategias de las 7E en el fortalecimiento de las habilidades de pensamiento crítico, interpretación y análisis de problemas en un grupo de profesores en química en formación (PQF).

4. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto de investigación se desarrolló bajo la línea de investigación *interdisciplinariedad y química en contexto: una perspectiva experimental en la didáctica de la química*, orientada a la caracterización de los procesos de enseñanza-aprendizaje de la química mediante prácticas experimentales contextualizadas. En este sentido, el grupo Didáctica y sus Ciencias y la Universidad Pedagógica Nacional desempeñan un papel fundamental en la formación de docentes, dado que promueven procesos investigativos

enfocados en la transformación de las prácticas educativas. Por ello, resulta pertinente analizar las estrategias implementadas en la formación inicial de profesores y proponer alternativas pedagógicas que contribuyan al fortalecimiento del pensamiento crítico y al desarrollo de prácticas experimentales en la enseñanza de la química.

Asimismo, las estrategias tradicionales presentan limitaciones en el desarrollo de competencias científicas, ya que suelen privilegiar la transmisión de contenidos sobre procesos que promueven el razonamiento y la comprensión profunda de los fenómenos científicos (Hofstein & Lunetta, 2004). En este contexto, la enseñanza de la química requiere ambientes de aprendizaje que promuevan la experimentación, el análisis de evidencias y la resolución de problemas, de manera que los estudiantes puedan establecer relaciones entre los conceptos científicos y su aplicación práctica (Seery, 2020). En consecuencia, el modelo integrado Thinking Classroom y las estrategias de las 7E constituyen una alternativa pedagógica que promueve procesos de aprendizaje fundamentados en la experimentación y el razonamiento analítico, fortaleciendo habilidades de pensamiento crítico en la formación de PQF mediante entornos orientados a la construcción y aplicación del conocimiento disciplinar (Liljedahl, 2021).

Por otra parte, la implementación del entorno de desarrollo integrado Arduino IDE y del lenguaje de programación Python para la codificación de sensores o electrodos de pH representa una alternativa innovadora en la enseñanza de la química (Vidal-Silva et al., 2019), puesto que favorece la adquisición y el análisis de datos in situ, promoviendo procesos de interpretación sustentados en la evidencia experimental (Vajpayee et al., 2017). Adicionalmente, estas herramientas tecnológicas permiten incorporar procesos relacionados con el diseño, la programación y el análisis de prototipos educativos, aspectos que adquieren relevancia en la educación científica contemporánea debido a su potencial para promover la creatividad, la innovación y la resolución de problemas mediante el desarrollo de instrumentos de laboratorio de bajo costo y fácil implementación.

En este sentido, la técnica potenciométrica ácido-base constituye un escenario pertinente para el desarrollo de habilidades analíticas y experimentales asociadas al uso de sensores o electrodos de pH. Su implementación permite interpretar conceptos fundamentales, tales como el potencial de membrana y su relación con la concentración de iones hidronio (H_3O^+) en soluciones acuosas, favoreciendo la comprensión de la ecuación de Nernst como principio teórico que describe el funcionamiento electroquímico y la actividad de las especies iónicas presentes en solución (Clavijo, 2002). Asimismo, posibilita el desarrollo de procesos de calibración mediante soluciones buffer y la comparación con instrumentos o equipos de referencia, evidenciado precisión y confiabilidad de las mediciones obtenidas.

Conforme a lo anterior, esta investigación se fundamentó bajo los planteamientos de Facione (2011), quien reconoció el pensamiento crítico como un conjunto de habilidades cognitivas orientadas a la interpretación y el análisis de problemas. Estas habilidades deben desarrollarse en los diferentes contextos educativos, en articulación

con los planes de estudio de los niveles de formación, con el fin de ayudar a desarrollar habilidades argumentativas, creativas y de apertura mental. Por esta razón, el presente trabajo investigativo adquiere relevancia al tener como propósito analizar los alcances del modelo integrado Thinking Classroom y las estrategias de las 7E en el fortalecimiento de las habilidades de pensamiento crítico, específicamente interpretación y análisis de problemas, en un grupo de PQF, a partir del abordaje de la técnica potenciométrica para la construcción de curvas de titulación ácido-base in situ, mediante el uso de un sistema medidor de pH basado en Arduino UNO y su integración con el Software TitrCurve.

5. ANTECEDENTES

En este apartado se presentan las contribuciones, metodologías y estrategias más significativas para el desarrollo de este trabajo investigativo, las cuales se obtuvieron mediante una búsqueda documental en diferentes bases de datos como *SciFinder*, *SpringerLink*, *ScienceDirect*, *Web of Science*, *Scopus*, *Taylor & Francis Online*, *Journal of Chemical Education*, *EBSCOhost*, *Dialnet*, *Scielo* y *Redalyc*. Para la búsqueda se utilizaron descriptores booleanos como: pensamiento crítico AND enseñanza de la química AND potenciometría en inglés y español, así como términos relacionados con *Python* y *Arduino*, restringiendo las publicaciones al período 2014-2024 dándole prioridad a las investigaciones de enfoque cualitativo y mixto en la educación superior. En estricta relación con lo señalado, se revisaron diversas investigaciones de carácter internacional, nacional y local, que permitieron orientar la presente investigación y afianzar el contexto particular con los objetivos a desarrollar.

5.1. Habilidades de Pensamiento Crítico

Considerando la revisión de estudios internacionales orientados al desarrollo de habilidades de pensamiento crítico en el contexto de la enseñanza de las ciencias, particularmente de la química, en el entorno educativo, se destaca el trabajo realizado por Afikah et al. (2024) titulado *Measuring Critical Thinking Skills in Science Learning: Students' Perception Versus Actual Performance*. En este, los investigadores tuvieron como objetivo determinar la percepción que tenían los estudiantes frente a sus habilidades de pensamiento crítico en el aprendizaje de ciencias y compararla con su desempeño real en el proceso de enseñanza-aprendizaje. El estudio se situó en una escuela secundaria de Yogyakarta, Indonesia, a través de una metodología cuantitativa descriptiva.

En este orden de ideas, los investigadores implementaron dos instrumentos principales: el primero, denominado el *Student Perception of Critical Thinking Questionnaire (SPCTQ)*, aplicado a 82 estudiantes de grado noveno (IX) mediante formularios electrónicos; y el segundo, la *Critical Thinking Observation Sheet (CTOS)*, completada por cuatro observadores durante dos sesiones de clase. La metodología constó de varias etapas: la recolección de datos a través de cuestionarios y observaciones, el procesamiento estadístico de los resultados utilizando Excel y el análisis de correlación entre las percepciones y el desempeño real de los estudiantes.

A partir del análisis cuantitativo planteado por Afikah et al. (2024), concluyeron que la percepción que los estudiantes tenían de sus habilidades de pensamiento crítico (SPCTQ) resultó ser superior a su desempeño observado (CTOS); sin embargo, no se encontró una relación significativa entre ambas variables. Esto indica que una percepción elevada de sus propias capacidades no necesariamente se traduce en un desempeño equivalente, evidenciando así la necesidad de implementar estrategias educativas que fortalezcan las habilidades de pensamiento crítico de manera práctica y no solamente basadas en la autoconfianza o la motivación individual.

Desde otra perspectiva, en la investigación desarrollada por los autores Dewi et al. (2025), denominada *Critical thinking skills of prospective chemistry teachers in chemistry learning whit Ethno-Socio- Scientific issues integrated inquiri*, se planteó como objeto de estudio desarrollar una estrategia de indagación válida y práctica, integrada con problemáticas Etno-Socio-Científicas (Ethno-SSI), orientada a mejorar las habilidades de pensamiento crítico en futuros docentes de química. De esta forma, el estudio se llevó a cabo con una muestra representativa de 52 estudiantes universitarios de primer semestre, inscritos en la asignatura de química básica en una de las universidades estatales de Java Oriental, Indonesia. En este sentido, se adoptó un enfoque de investigación y desarrollo basado en el modelo de Plomp, que consistió en tres fases: investigación preliminar, ejecución del prototipo y evaluación del producto. Como resultado, se diseñó una estrategia didáctica llamada OETACA (orientación, exploración, transformación, argumentación, conclusión y aplicación), la cual fue implementada en el contexto del tema de termoquímica, incorporando elementos de la cultura local como punto de partida para la discusión de problemáticas científicas de carácter ético, social y ambiental.

Entre las conclusiones de este estudio, se destaca que la aplicación de la estrategia OETACA permitió mejorar significativamente las habilidades de pensamiento crítico de los futuros docentes de química, con una medida N-Gian de 0,70 (categoría alta, obtenida mediante la aplicación del pretest y postest), evidenciando una mayor capacidad para analizar, argumentar y tomar decisiones fundamentadas ante situaciones complejas. Asimismo, Dewi et al. (2025) observaron que el uso de contextos locales y la conexión entre el conocimiento tradicional y el saber científico facilitó una comprensión más profunda de los conceptos químicos y una vinculación más acertada con el aprendizaje. Por ello, sugieren integrar dimensiones culturales y socio-científicas en la enseñanza de la química, con el fin de contribuir a una formación más crítica, reflexiva y contextualizada en los futuros docentes de química.

En relación con lo anterior, resulta pertinente mencionar el estudio de Hakim y Talib (2024), ya que identifica los principales desafíos que enfrentan los educadores malayos al promover el desarrollo de habilidades de pensamiento crítico en la enseñanza de la química, así como los factores que condicionan su implementación en el aula. Por lo tanto, el propósito de la investigación fue explorar las experiencias de los respectivos docentes de química al aplicar el pensamiento crítico durante sus clases. Este estudio de carácter cualitativo, se llevó a cabo a través de la técnica de muestreo intencional como medio de recopilación de datos, los cuales se recolectaron mediante entrevistas semiestructuradas

con siete encuestados encargados de la asignatura de química (cuatro docentes de secundaria y tres docentes universitarios) que tenían más de cinco años de experiencia en el campo académico. En efecto a lo anterior, el análisis de las entrevistas permitió identificar siete desafíos relevantes: dificultad para fomentar el pensamiento autónomo del estudiante, dependencia del docente para la resolución de problemas, Currículo y naturaleza abstracta de la química, brecha entre teoría y práctica, Falta de conocimiento sobre el pensamiento crítico, proceso prolongado y continuo y ambiente del aula poco propicio. En conclusión, aunque Hakim y Talib, (2024), presentan una intención pedagógica por integrar el pensamiento crítico en el contexto educativo de Malasia, factores estructurales y culturales limitan su implementación efectiva en el aula. Sin embargo, hacen énfasis en la necesidad de replantear o reformar estrategias metodológicas que contribuyan con un desarrollo competente y sostenible del pensamiento crítico en la enseñanza de la química. En cuanto a la pertinencia de este antecedente, el estudio de Hakim y Talib (2024) resulta relevante para la presente investigación, ya que evidencia que el desarrollo de las habilidades de pensamiento crítico en la enseñanza de la química enfrenta desafíos asociados con las prácticas pedagógicas, la formación docente y las características propias de la disciplina. Estos hallazgos justifican la necesidad de diseñar e implementar estrategias didácticas que promuevan una participación activa del estudiante y favorezcan procesos de razonamiento durante el aprendizaje.

Por su parte, Velázquez y Valenzuela, (2024), en su artículo titulado Percepciones de estudiantes universitarios sobre las habilidades de pensamiento crítico, examinaron el nivel de desarrollo de estas habilidades percibidas por los estudiantes de la Universidad Nacional de Pilar (Paraguay) en el año 2023. En este orden de ideas, se evaluaron a 341 estudiantes de distintas carreras, aplicando un modelo investigativo de naturaleza cuantitativa, observacional y de corte transversal mediante un cuestionario tipo Likert diseñado y validado para medir la autopercepción de habilidades críticas. Dentro de las conclusiones de este estudio, se encontró que los estudiantes alcanzaron un nivel intermedio con respecto a sus percepciones de habilidades de pensamiento crítico, representando un valor promedio del 62% en todas las habilidades evaluadas y poniendo de manifiesto un decrecimiento en sus capacidades de pensar conforme a la exigencia o al aumento de complejidad en las tareas asignadas. Asimismo, Velázquez y Valenzuela, (2024), destacan la necesidad de potenciar estas habilidades desde la academia universitaria, sugiriendo que una mayor vinculación de estrategias activas para la enseñanza-aprendizaje puedan contribuir la formación de pensamiento crítico en estudiantes universitarios. En cuanto a la pertinencia de este antecedente, el estudio de Velázquez y Valenzuela (2024) aporta evidencia sobre el estado de desarrollo de las habilidades de pensamiento crítico en estudiantes universitarios, al identificar un nivel intermedio en su autopercepción y una disminución de estas habilidades conforme aumenta la complejidad de las tareas académicas. Estos hallazgos son relevantes para la presente investigación, ya que ponen de manifiesto la necesidad de incorporar estrategias didácticas que favorezcan procesos de razonamiento de mayor nivel cognitivo y promuevan el fortalecimiento del pensamiento crítico en la educación superior. En este

sentido, aunque el estudio no se desarrolla en el contexto específico de la enseñanza de la química ni con profesores de química en formación, sus resultados respaldan la importancia de implementar propuestas pedagógicas que contribuyan al desarrollo de habilidades de interpretación y análisis, propósito que orienta la presente investigación mediante la integración del modelo Thinking Classroom y las estrategias de las 7E en una secuencia de actividades sobre potenciometría ácido-base.

A nivel nacional, se destaca el trabajo investigativo titulado Caracterización de habilidades de pensamiento crítico medidas por la química en contexto en relación con la absorción de Hg^{2+} sobre $\alpha\text{-F}_2\text{O}_3$ -nano soportadas en matriz biopolimérica, implementado por Pérez y Pérez (2023) en la Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá (Colombia). Este estudio tuvo como objetivo caracterizar dos habilidades de pensamiento crítico, interpretación y análisis de problemas en un grupo de profesores de química en formación, abordando cuestiones químicas en contexto relacionadas con la contaminación del agua por mercurio y su remoción a través de nanopartículas de hematita soportadas en una matriz biopolimérica. Bajo esta perspectiva, la aplicación de la secuencia didáctica integró actividades experimentales como la síntesis, funcionalización y evaluación de las nanopartículas como adsorbentes de este metal pesado en el agua. El enfoque mixto utilizado, permitió analizar en la población de estudio el desarrollo de las habilidades de interpretación y análisis de problemas contextualizados desde la química, mediante instrumentos previamente validados como el test de ideas previas, entrevistas y evaluaciones finales. En relación con lo anterior, se concluyó que la habilidad de pensamiento crítico que presentó mayores cambios significativos fue la habilidad de análisis, mientras que la habilidad de interpretación mostró cambios menores. Por lo tanto, los estudiantes demostraron mejoras notables en su capacidad para pensar críticamente, analizando problemas e interpretando información compleja. Además, evidenciaron acercamiento a técnicas y métodos de análisis químico, fomentando la comprensión y el manejo de conceptos asociados a la nanotecnología para la remoción de mercurio en agua.

Los estudios revisados anteriormente evidencian la importancia de fortalecer las habilidades de pensamiento crítico, especialmente las relacionadas con la interpretación, el análisis, en el contexto de la enseñanza de la química y de la educación superior. Asimismo, ponen de manifiesto la necesidad de implementar estrategias didácticas que favorezcan el desarrollo de estas habilidades, aspecto que fundamenta el diseño de la propuesta planteada en la presente investigación.

5.2 Modelo integrado del Thinking Classroom y las 7E

La tesis presentada por Beltrán, (2023) tiene como objetivo fortalecer la capacidad argumentativa en educación secundaria, específicamente de 20 estudiantes de grado décimo de una institución privada de Bogotá. Esta investigación se realizó mediante la implementación del modelo integrado Thinking Classroom y las 7E en la enseñanza del concepto gas. El enfoque propuesto por la autora fue mixto, orientado a un diseño de investigación holístico, de carácter descriptivo, con el propósito de fortalecer la habilidad argumentativa de los estudiantes. Las fases implementadas fueron: diagnóstico, diseño,

intervención en el aula y recolección de datos. Como resultado, se evidenció un avance importante en los niveles de argumentación, obteniendo así un 65 % en el nivel analítico, un 20 % en el nivel empírico y un 15% en el nivel hermenéutico en los estudiantes. Finalmente, es importante señalar que los resultados anteriormente expuestos se obtuvieron por medio del Test de Halpern y los análisis realizados con la herramienta IRAMUTEQ, los cuales mostraron el progreso paulatino de la habilidad argumentativa.

En este mismo contexto, Ladino y Páez (2019) presentan los resultados de una investigación orientada al fortalecimiento del pensamiento crítico bajo los lineamientos de Rober Ennis (1985). Este estudio se llevó a cabo en estudiantes de grado décimo (10 °), mediante la ejecución de una secuencia de enseñanza y aprendizaje (SEA) basada en el modelo de aprendizaje de las 7E. La estrategia se centró en el enfoque Ciencia-Tecnología-Sociedad (CTS), con la finalidad de fomentar un aprendizaje contextualizado que favoreciera el desarrollo de las habilidades de análisis, tales como la interpretación, inferencia y explicación. De esta manera, la investigación se delimitó dentro de un enfoque mixto con un diseño cuasiexperimental (pretest y posttest), manifestando cambios importantes en las concepciones de los estudiantes sobre ciencia y tecnología, así como en avances de los niveles de pensamiento crítico, medidos a partir del Test de Cornell y el cuestionario de opiniones sobre Ciencia, Tecnología y Sociedad (COCTS).

En síntesis, los resultados esperados por Ladino y Páez (2019) permiten demostrar que la aplicación parcial de la SEA bajo el modelo de las 7E promueve la apropiación conceptual y el desarrollo de las habilidades de pensamiento crítico, ubicando a los estudiantes de grado décimo en un nivel más reflexivo frente a la ciencia y tecnología en una sociedad contextualizada.

De manera contributiva, el trabajo presentado por Rodríguez et al. (2020), titulado Laboratorio de química bajo el contexto: insumo para el desarrollo de habilidades de pensamiento crítico. Resaltan la importancia de promover como objeto de estudio el desarrollo de habilidades de pensamiento crítico, particularmente la interpretación y argumentación en la formación universitaria de profesionales relacionados con la química, mediante la implementación de mini proyectos contextualizados en el laboratorio. La ejecución se llevó a cabo con un grupo de estudiantes inscritos a la asignatura de Química Agroalimentaria (Ciclo de profundización) de la Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional, ubicada en Bogotá (Colombia), quienes abordaron actividades prácticas sobre la química de alimentos.

Esta investigación, de enfoque mixto y diseño preexperimental, empleó un instrumento validado con preguntas abiertas para valorar el nivel de desarrollo de las habilidades de pensamiento crítico antes y después de la intervención. Los resultados demostraron progresos significativos, especialmente en la habilidad de índole argumentativa, asociados al trabajo autónomo y reflexivo que implica los mini proyectos, sustentados en la resolución de situaciones reales y contextualizadas. Por último, pero no menos importante, se asevera que este tipo de intervención estimula de manera positiva la promoción de las habilidades interpretativas y argumentativas.

Por otra parte, en la tesis de maestría elaborada por Ocampo (2017), tuvo como objetivo promover el desarrollo de habilidades de pensamiento crítico en estudiantes de grado undécimo del colegio INEM Santiago Pérez, ubicado en Bogotá D.C, mediante el empleo de laboratorios virtuales como estrategia para minimizar el impacto de la salud humana en relación con los hidrocarburos aromáticos. Esta propuesta fue fundamentó en una unidad didáctica basada en el modelo de las 7E, la cual integró herramientas tecnológicas, como por ejemplo el software “*Model ChemLab*” y “*Lab Wizard*” para que se abordaran temas asociado a las problemáticas ambientales y de salud desde la educación. En efecto, al ser una investigación con enfoque cualitativo y alcance descriptivo, permitió al autor identificar, por medio de actividades de laboratorio, niveles alcanzados en habilidades como el análisis, la inferencia y la interpretación, esenciales para el pensamiento crítico. En síntesis, se concluye que, con la implementación del modelo de las 7E como estrategia metodológica, se fortaleció notablemente la unidad didáctica, dado que las actividades contemplaron aspectos relevantes que favorecieron el pensamiento crítico en contextos reales en donde las prácticas experimentales de tipo presencial son limitadas.

En este caso, las investigaciones previamente discutidas demuestran la eficacia de implementar este modelo integrado Thinking Classroom y las estrategias de las 7E para caracterizar el desarrollo las habilidades de pensamiento crítico, lo cual orienta el diseño y construcción de la secuencia didáctica para la presente investigación.

5.3 Potenciometría Ácido-Base y la implementación del software Arduino IDE

Dentro de los antecedentes recopilados a nivel internacional, es importante mencionar el artículo científico Automatización de una valoración volumétrica ácido-base como prototipo educativo, realizado por Arellano et al. (2022) y aplicado en México. En este estudio, los autores propusieron una propuesta educativa de tipo interdisciplinario que integró contenidos de química, física y programación, con el propósito de mejorar los procesos de enseñanza-aprendizaje mediante la construcción y uso de un prototipo automatizado destinado a la valoración volumétrica y basado en microcontroladores como Arduino. La propuesta se fundamentó en el enfoque del alineamiento constructivo, articulando objetivos, actividades y evaluación auténtica para fortalecer la comprensión de los conceptos químicos ácido-base. Para ello, se aplicó una metodología basada en el diseño de situaciones contextualizadas, observando, a partir de los resultados, que los estudiantes demostraron una mayor disposición hacia la experimentación, así como un mejor desempeño conceptual y actitudinal frente al fenómeno químico abordado. En consecuencia, los autores concluyeron que la mediación docente, el uso intencionado de herramientas tecnológicas y el diseño didáctico centrado en el estudiante favorecen el aprendizaje significativo y el desarrollo de competencias científicas (Arellano et al., 2024).

En otro contexto, también se destaca la investigación Design and Construction of a Low-Cost Arduino-Based pH Sensor for the Visually Impaired Using Universal pH Paper, desarrollada por Qutieshat et al. (2019) en Jordania. En este proyecto, se diseñó un

sensor de pH utilizando Arduino, construido específicamente para facilitar el aprendizaje de estudiantes con discapacidad visual en laboratorios de química. El dispositivo utilizó un papel indicador de pH, y además un sensor de color RGB para detectar cambios o fluctuaciones en el pH. Los investigadores destacan que el sensor es de bajo costo, es decir, por menos de \$40 USD, fácil de ensamblar y utiliza componentes accesibles como por ejemplo un microprocesador Arduino, un sensor TCS34725 y un zumbador piezoeléctrico. Además, el dispositivo incluía una carcasa impresa en 3D para proteger los componentes y facilitar su uso. La calibración de este sensor de pH se realizó con soluciones amortiguadoras de pH conocido, y el sistema fue evaluado positivamente por los estudiantes con discapacidad visual, quienes pudieron interpretar los resultados de manera independiente. Se concluye que este tipo de instrumentos diseñados aborda una brecha en la educación inclusiva, incluso también ofrece una solución innovadora y escalable para laboratorios con insumos o recursos limitados.

En este sentido, se destacan investigaciones que integren tecnologías accesibles y de bajo costo para aplicaciones científicas y educativas. Por ejemplo, en Chile, Vidal-Silva et al. (2019) implementaron un proyecto basado en Arduino para estudiantes de ingeniería informática, demostrando su eficacia en la obtención de variables ambientales y el control de sistemas, incluso para personas sin información previa en electrónica. Por otro lado, en India, Vajpayee et al. (2017) diseñaron e implementaron un sensor de pH nanoestructurado empleando antimonio (Sb) y Zinc (Zn), conectado con Arduino para aplicaciones en agricultura de precisión. Ambos trabajos destacan el potencial de estas herramientas como tecnologías multifuncionales y accesibles, tanto para facilitar el aprendizaje en los entornos educativos o para ofrecer soluciones tecnológicas en campos como la agricultura e ingeniería. Por lo tanto, se puede inferir que la combinación de hardware y software abierto contribuye significativamente la educación científica, reduciendo costos y barreras técnicas.

A nivel nacional, en Colombia, la agricultura enfrenta desafíos significativos debido a la falta de herramientas accesibles para medir oportunamente el pH del suelo, lo que afecta a la productividad de cultivos como maíz, papa y arracha, especialmente en regiones como Chiquinquirá (Vereda Quiche). Este problema se evidenció a nivel local a través de las pérdidas económicas causadas por suelos desbalanceados, lo que motivó a Aldana (2016) a desarrollar un prototipo: el robot medidor de pH, presentado en su tesis de pregrado en la Universidad Pedagógica Nacional. Este proyecto, basado en Arduino Mega 2560 y sensores analógicos, demostró la viabilidad de automatizar las mediciones de pH en terrenos llanos mediante la integración de un sistema de adquisición de datos con un software desarrollado en Java/NetBeans para la gestión de la información generada por el sensor.

Por último, a nivel nacional, Camargo et al. (s.f) desarrollaron un sistema de medición de pH utilizando Arduino IDE, con el empleo de un electrodo de vidrio y una placa de alta impedancia. En este proyecto se presentaron inconvenientes en la calibración inicial del electrodo, se logró demostrar la viabilidad de construir equipos de bajo costo para aplicaciones en el área de la química, como, por ejemplo, en las titulaciones

potenciométricas. De hecho, a nivel local, en la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, este trabajo destacó la importancia de trabajar con Arduino por su gran potencial en el acceso a herramientas de laboratorio, lo que permitió a los estudiantes comprender y optimizar tanto la conceptualización como el funcionamiento adecuado de un electrodo real, en comparación con uno completamente diseñado y adaptado específicamente para la medición de pH en las volumetrías ácido-base.

Los antecedentes revisados evidencian que el uso de plataformas de hardware y software de código abierto constituye una alternativa viable para el desarrollo de aplicaciones en química analítica e instrumental, al facilitar la automatización de procesos experimentales, la adquisición de datos y la implementación de sistemas de bajo costo. Estos aportes fundamentan la presente investigación, ya que respaldan el empleo de tecnologías como Arduino en el diseño de recursos tecnológicos aplicados a la enseñanza de la potenciometría ácido-base y ponen de manifiesto su potencial como apoyo a las prácticas experimentales en contextos educativos.

6 MARCO REFERENCIAL

El propósito de este apartado es dar a conocer los fundamentos teóricos que orientaron crucialmente la investigación en el ámbito didáctico y el campo disciplinar propios de la química, mostrando una formulación de conceptos de investigación experimental discutidos por diversos autores para la contribución del presente estudio.

6.1. Pensamiento Crítico

El pensamiento crítico ha sido definido de distintas formas a lo largo de la historia por autores que han postulado sus investigaciones en relación con este concepto y la necesidad de implementarlo en los procesos educativos. Desde la perspectiva de Ennis en (1962), el pensamiento crítico se define como la habilidad de formar juicios razonados y bien fundamentados de manera lógica, lo que implica utilizar una combinación de destrezas como la interpretación, el análisis, la explicación, la inferencia y la evaluación en contextos personales, sociales y políticos con el fin de contribuir al éxito individual y profesional.

La capacidad de pensar de manera crítica permite distinguir entre argumentos bien fundamentados y aquellos que carecen de soporte suficiente, mediante un proceso de razonamiento cuidadoso y una disposición hacia la reflexión imparcial. En este sentido, el desarrollo de las habilidades de pensamiento crítico resulta fundamental para la vida personal y profesional, ya que favorece el análisis, la interpretación y la toma de decisiones fundamentadas en diversos contextos.

En primer lugar, Robert Ennis concibe las disposiciones del pensamiento crítico como las actitudes o tendencias que predisponen a los individuos a responder de manera crítica frente a problemas o desafíos. En este sentido, plantea que estas deben evaluarse considerando tanto el número de personas que las poseen como la forma en que se manifiestan en diferentes contextos. De acuerdo con Ennis (1996), dicha evaluación proporciona retroalimentación tanto a los individuos como a los educadores, permitiendo

identificar aspectos susceptibles de mejora y orientar la instrucción y el entrenamiento explícitos para fortalecer estas actitudes.

Otra perspectiva propuesta por Paul (1984) se refiere a un plan de estudios que se concentre en desarrollar habilidades como hacer preguntas, razonar y evaluar la evidencia. Esto anima a los profesores a cultivar el pensamiento libre y cuestionar la sabiduría aceptada. La preeminencia en el discernimiento de racionalizar, como se mencionó previamente, y un aprecio al pensamiento libre y aplicado. El autor agrega que es sustancial enseñar a los estudiantes a conocer y a cuestionar distintas perspectivas y a evaluar la evidencia de diferentes fuentes. En este sentido la educación debe ayudar a los estudiantes a comunicarse de manera efectiva y propiciar diálogos productivos con las personas.

El autor más relevante en esta investigación será Peter Facione, quien argumenta que el pensamiento crítico es un componente esencial para un líder, ya que, de no poseerlo, podrían tomar decisiones erróneas y, en general, cometer errores en su papel. De acuerdo con esta perspectiva, Facione lo define como un juicio reflexivo y orientado al propósito que se concretiza en favor de las decisiones racionales y basadas en la evidencia. Asimismo, identifica varios elementos claves entre los que se incluyen el análisis, la interpretación, la evaluación, la inferencia, la explicación y la autorregulación.

A partir de lo anterior, también se sugiere que los líderes que poseen estas habilidades son mejor preparados para abordar desafíos complejos y hacer elecciones informadas. Sin embargo, Facione (1998) sostiene que el pensamiento crítico no se limita al desarrollo de las habilidades cognitivas. Además de estas, es necesario promover actitudes que motiven a las personas a emplear dichas habilidades de manera consciente, reflexiva y constante en la resolución de problemas y la toma de decisiones.

6.2. Habilidades de Pensamiento Crítico

El pensamiento crítico debe enseñarse y promoverse de manera intencionada en el aula mediante estrategias didácticas que involucren la resolución de problemas, el análisis de situaciones, la argumentación, la formulación de preguntas y la reflexión sobre el propio proceso de aprendizaje. Estas acciones permiten a los estudiantes abordar problemas, seleccionar soluciones fundamentadas y construir conocimiento de manera autónoma, incluso a partir de procesos de investigación. Sin embargo, es importante mencionar que el pensamiento crítico demanda un alto grado de análisis, reflexión y autorregulación (Beltran, 2023). Teniendo en cuenta lo anterior, se presenta una revisión sobre las diferentes percepciones de habilidades y aquellas que se seleccionaron en la investigación.

En este sentido, Halpern (2006) argumenta que se deben utilizar las habilidades para entender una situación e intervenir para obtener la solución, por lo que las denota en cinco: Habilidad de razonamiento verbal, Habilidad de análisis de argumentos, Habilidad de prueba de hipótesis, Habilidad en el uso de riesgo e incertidumbre, y Habilidad para tomar decisiones y resolver problemas.

Desde el punto de vista de Bezanilla et al. (2018), se plantea que las habilidades de pensamiento crítico son: Analizar, Razonar, Cuestionar, Evaluar, Tomar decisiones y Actuar. Por ende, dichas habilidades son las que están presentes en una situación problema, en la que se debe actuar de forma analítica y razonable para continuar con una acción que se puede manifestar de manera positiva o negativa según el contexto.

Considerando que este trabajo investigativo busca fortalecer las habilidades de interpretación y análisis del pensamiento crítico, en la **Tabla 1**, se describen estas habilidades, extraídas del informe Delphi liderado por Facione. En este informe, se define como un juicio intencional y autorregulador que se manifiesta en interpretación, análisis, evaluación e inferencia (Facione, 1990).

Tabla 1. Declaración de consenso de expertos sobre las habilidades de pensamiento crítico interpretación y análisis.

HABILIDADES DE PENSAMIENTO CRÍTICO		
HABILIDADES	DESCRIPCIÓN	SUBHABILIDADES
Interpretación	Se utiliza para la comprensión y expresar el sentido o significado de cualquier experiencia, eventos y procesos.	• Categorizar información. • Decodificar significados.
Análisis	Identifica las relaciones inferenciales entre preguntas, conceptos o formas de representación de información u opiniones.	• Examinar ideas. • Identificar argumentos. • Analizar argumentos.

Nota. Informe Delphi (1990) Tomado y adaptado de Pérez y Pérez (2023)

De acuerdo con la **Tabla 1**, Delphi propone los criterios que se deben tener en cuenta, y, por ende, las sub-habilidades que proporcionan una comprensión de las habilidades en el grupo de estudio. En relación con lo anterior, Facione, (2011) propone una serie de subcategorías (**Tabla 2**) que nos contribuyeron a la categorización de estas habilidades de pensamiento crítico en el trabajo investigativo.

Tabla 2. Subcategorías de las habilidades de pensamiento crítico Interpretación y Análisis.

HABILIDAD	SUBCATEGORIAS	DEFINICIÓN
Interpretación	Categorización	Consiste en organizar la información en categorías adecuadas para entenderlas y describirlas perfectamente.

	Decodificación de significados	Se refiere a reconocer y describir los significados señalados en sistemas de comunicación, como el lenguaje, los gráficos, imágenes y comportamiento social.
Análisis	Examinar ideas	Analizar el papel de diferentes expresiones dentro de un argumento o contexto desde diferentes puntos de vista.
	Identificación de argumentos	Implica identificar si el conjunto expresa una razón para refutar o aprobar una opinión, o punto de vista en particular.
	Analizar argumentos	Capacidad para examinar la estructura de un argumento científico, estableciendo relaciones entre las razones, evidencias y conclusiones, con el propósito de determinar cómo estas se articulan para sustentar una afirmación.

Nota. Facione (2011) Tomado y adaptado de Pérez y Pérez (2023)

Las habilidades de interpretación y análisis de problemas permiten obtener el desarrollo de apertura mental en los estudiantes, motivándolos a la indagación, creatividad y comprensión de una temática relacionada, en este caso, con la potenciometría. Complementando lo anteriormente mencionado, se evidencia la necesidad de implementar una serie de estrategias que permitan el desarrollo de las habilidades de pensamiento crítico; por lo tanto, en esta investigación se decidió implementar el modelo integrado Thinking Classroom, acompañado del modelo de las 7E.

6.3. Modelo Integrado Thinking Classroom

Este modelo surge en pleno siglo XXI con el fin de satisfacer las demandas de la educación, creando nuevas estrategias de aprendizaje fortaleciendo las habilidades de pensamiento crítico. Se considera aulas pensantes o mejor conocido como Thinking Classroom aquel modelo que incentiva el pensamiento crítico en los estudiantes. Por ello,

se centra en el desarrollo de habilidades cognitivas de orden superior en los estudiantes, desde edades tempranas. Esto ha representado un cambio significativo en la educación, ya que, durante años, los procesos formativos se han enfocado principalmente en desarrollar procesos de memorización, lo cual no favorece el aprendizaje a largo plazo (Beltran,2023).

Desde la perspectiva de Liljedahl (2021), establece que la organización del salón de clases puede afectar al desarrollo del aprendizaje, generando en el estudiante una percepción monótona de su formación. Esto se evidencia que, a lo largo de la historia, han evolucionado los recursos en el aula e incluso la tecnología; sin embargo, los estudiantes siguen el rol de no aportar nada a la clase observándose como receptores y el docente como un transmisor de conceptos. Por lo que el desarrollo de las habilidades de pensamiento crítico orienta al estudiante a cuestionarse de manera sistemática, como evaluar y estructurar la información, asumiendo el rol activo de pensador crítico formulando opiniones y aportes bien argumentados. Desde el enfoque de Liljedahl, (2021) en su libro “Building Thinking Classroom in Mathematics”, postula catorce estrategias (**Figura 1**) centradas en el estudiante para aplicarse en el aula.

Figura 1. Catorce estrategias del Thinking Classroom.

MODELO INTEGRADO THINKING CLASSROOM	
CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
 Tipos de Tareas	Variadas y abiertas
 Grupos Colaborativos	Los estudiantes trabajan juntos
 Espacio de Trabajo Estudiantil	Flexible y adaptable
 Disposición del Mobiliario	Diseñado para la colaboración
 Manejo de Preguntas	Los estudiantes se responden entre sí
 Asignación de Tareas	Los estudiantes tienen cierta elección
 Visibilidad de Tareas	Las tareas se muestran de manera prominente
 Fomento de la Autonomía	Los estudiantes toman decisiones
 Sugerencias y Extensiones	Utilizadas para profundizar la comprensión
 Consolidación de Lecciones	Los estudiantes reflexionan sobre el aprendizaje
 Toma de Notas	Los estudiantes sintetizan información
 Revisión de Evaluación	Comprensión y aplicación
 Evaluación Formativa	Utilizada para guiar la instrucción
 Calificación del Aula	Basada en el crecimiento y el esfuerzo

Nota. Elaboración propia. Tomado y adaptado de Liljedahl, (2021)

Para este trabajo de investigación, de las catorce estrategias, se seleccionaron seis de ellas para el desarrollo de las habilidades de pensamiento crítico interpretación y análisis, como se observan en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Estrategias seleccionadas del Thinking Classroom para el desarrollo del trabajo investigativo.

ESTATEGIA	APLICACIÓN
Manejo de tareas usadas	Durante el desarrollo de la clase, proporcionar a los estudiantes tareas atractivas que los orienten a reflexionar.
Grupos colaborativos	Generar grupos que sean totalmente aleatorios, favoreciendo una mentalidad abierta y participación grupal.
¿Cómo se dispone el mobiliario?	Se rompe con la ubicación tradicional en el salón de clases, generando espacios participativos y de diálogo.
¿Cómo se responden preguntas?	Los docentes no deben responder preguntas de la forma si, no o tal vez. Si no deben ser respuestas que generen nuevos interrogantes.
Consolidación de una lección	Al finalizar la clase, se realiza de intervención de 5 minutos sobre lo trabajado en clase, propiciando la participación de todos los estudiantes sobre lo aprendido en la clase.
¿Dónde trabajan los estudiantes?	Se promueve en los estudiantes el trabajo en superficies verticales no permanentes, favoreció en ellos la toma de riesgos, se fortaleció el trabajo cooperativo al tener en cuenta los aportes de todos para lograr la construcción de la actividad propuesta.

Nota. Tomado y adaptado de Liljedahl, (2021)

Estas seis estrategias fueron seleccionadas por su pertinencia para orientar el diseño de las actividades que conforman la secuencia didáctica. Su elección responde al propósito de implementarlas de manera articulada durante la elaboración y aplicación de dicha secuencia, en concordancia con los objetivos de la presente investigación.

6.4. Modelo de las 7E

Este modelo fue propuesto en el año 2003 por Arthur Eisenkraft como una estrategia de enseñanza-aprendizaje. Es conocido como el modelo de las 7E, porque aborda un conjunto de siete estrategias que llevan por nombre verbos que comienzan con la letra E. Los cuales son: Enganchar, Elicitar, Explorar, Explicar, Elaborar, Evaluar y Extender. (**Tabla 4**).

Este modelo se consolida como una estrategia que permite la elaboración de secuencias didácticas, debido a su hilo conductor en la planeación y realización de

actividades de manera flexible, lo que significa que algunas de las fases se pueden realizar en conjunto o también encaminarse una sobre otras (Gómez & Ramírez, 2018).

Tabla 4. Estrategias del modelo de las 7E.

MODELO DE LAS 7E	
ESTRATEGIA	DESCRIPCIÓN
Enganchar	Significa crear en el estudiante interés y curiosidad, sobre la propuesta que se está trabajando.
Elicitar	Reconocer los conceptos iniciales de los estudiantes, para generar un ambiente apropiado.
Explorar	A partir de las actividades planteadas, los estudiantes profundizan en el tema de estudio.
Explicar	El docente utiliza conceptos disciplinares, para que los estudiantes complementen el resultado de su aprendizaje.
Elaborar	El estudiante aplica con facilidad los nuevos conocimientos adquiridos en nuevos problemas planteados.
Evaluar	Se realiza una evaluación a partir de la implementación de la secuencia didáctica, que se permita observar el proceso adquirido en los estudiantes.
Extender	En esta parte del modelo, se tiene la capacidad de transferir y aplicar el conocimiento aprendido a otros ambientes que exijan de ellos un nivel mayor de creatividad.

Nota. Tomado y adaptado de Beltrán, (2023)

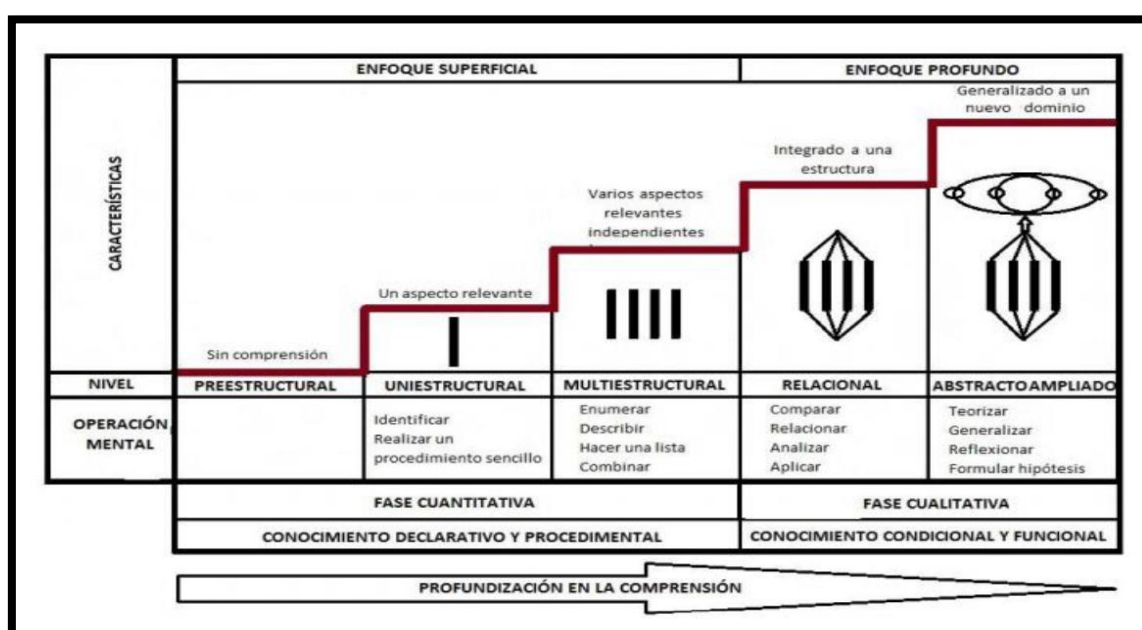
Estas estrategias han sido de muy importante, ya que se debe de tener en cuenta las ideas previas y la construcción de un aprendizaje transferible articulando de forma significativa el diagnóstico, el desarrollo y la evaluación, en la aplicación de una secuencia de actividades.

En conjunto, los aportes del modelo integrado Thinking Classroom y de las estrategias de las 7E constituyen el fundamento pedagógico de la presente investigación. Mientras el Thinking Classroom orienta la creación de ambientes de aprendizaje que favorecen la participación activa, el trabajo colaborativo y el desarrollo de habilidades de pensamiento, las 7E proporcionan una estructura metodológica que organiza el proceso de enseñanza y aprendizaje en fases secuenciales. La articulación de ambos enfoques permite diseñar una secuencia didáctica que integra estrategias centradas en el estudiante con una planificación estructurada de las actividades, en coherencia con el propósito de promover las habilidades de interpretación y análisis en la enseñanza de la potenciometría ácido-base.

6.5. Taxonomía SOLO

La Taxonomía SOLO (según sus siglas: *Structure of Observed Learning Outcome*), se entiende como la estructura de los resultados de aprendizaje observable. Según Biggs (2005), es un mecanismo sistemático para especificar cómo se evidencia el incremento de la complejidad de la intervención de un estudiante al enfrentarse a diferentes sucesos académicos. En este sentido, el proceso de enseñanza-aprendizaje adquiere progresivamente una mayor complejidad estructural, avanzando desde una fase cuantitativa hacia una fase cualitativa. Cada una de estas fases comprende niveles específicos que responden a distintas características del aprendizaje como se observa en la **Figura 2**.

Figura 2. Representación niveles de la Taxonomía SOLO.



Nota. Tomada de Soler (2015)

En relación con la **Figura 2**, se describen la fase cuantitativa y cualitativa con sus respectivos niveles de análisis.

- **Fase cuantitativa:** Esta fase se analiza desde la cantidad de información que puede recolectar un estudiante con un bajo nivel de profundidad.
 1. **Nivel preestructural:** La información que brindan los estudiantes carece de comprensión o resulta errónea frente a la temática.
 2. **Nivel uniestructural:** Los estudiantes proporcionan información basada en aspectos poco relevantes o en ideas derivadas de sus conocimientos previos.
 3. **Nivel multiestructural:** La información que recolectan los estudiantes se caracteriza por estar organizada de forma secuencial, lo que permite dar respuestas coherentes.

- **Fase cualitativa:** Esta fase hace énfasis en la profundidad y uso correcto de la información recolectada para alcanzar los objetivos planteados.
1. **Nivel relacional:** El estudiante establece relaciones entre diversos aspectos, siguiendo una secuencialidad y coherencia que favorecen la comprensión y análisis de la temática.
 2. **Nivel abstracto ampliado:** Este nivel representa el mayor grado de complejidad en el proceso de aprendizaje. El estudiante, partiendo del nivel relacional, es capaz de ir más allá de la información proporcionada, realizando procedimientos y generalizaciones que conducen a un análisis profundo y enriquecen sus respuestas.

6.6 Fundamento de la potenciometría

De acuerdo con Agreda, (2024), las técnicas de análisis que utilizan celdas electroquímicas para evaluar el potencial eléctrico de disoluciones en equilibrio se les llama potenciometrías. Así, la potenciometría consiste en determinar una diferencia de potencial eléctrico medible, la cual representa la energía potencial asociada al movimiento de las cargas eléctricas entre dos electrodos de una celda electroquímica. Dado que el procedimiento involucra el desplazamiento de especies con carga eléctrica, un paso de corriente siempre debe existir; de lo contrario, no se podría medir un potencial. Es decir, para que se alcance dicha medida se requiere de un circuito eléctrico.

Adicionalmente, podemos clasificar las potenciometrías como directas en donde la superficie del electrodo forma una parte activa de la medida, e indirectas que son cuando se utilizan para una titulación. Entonces, es así como las mediciones potenciométricas directas nos permiten obtener la concentración del analito de interés mediante una sola medición realizada. A diferencia de las mediciones indirectas que se necesitan varias medidas antes de obtener el resultado cuantitativo como por ejemplo las titulaciones potenciométricas; en donde el electrodo es un simple indicador del respectivo avance titulométrico. En este orden de ideas es sumamente importante mencionar que, en este último tipo de clasificación, lo único que le interesa al analista químico de la señal del electrodo es el cambio abrupto que se evidencia cuando se pasa por el punto de equivalencia (Agreda, 2024).

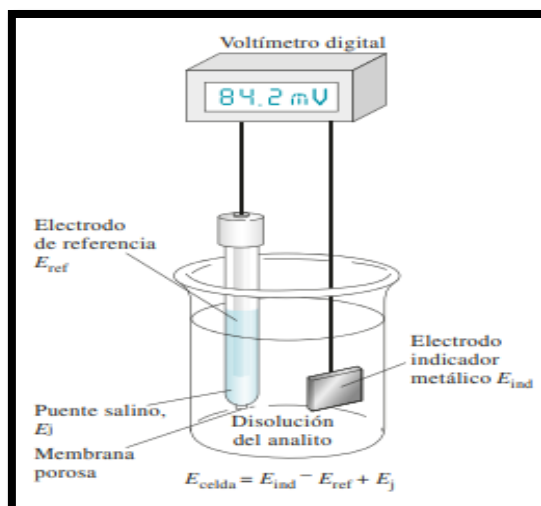
6.7 Potenciometría ácido-base

La potenciometría ácido-base se puede definir como una técnica instrumental de la química analítica, empleada para determinar la concentración de especies iónicas por medio de la medición de la diferencia de potencial entre un electrodo indicador (EI) y un electrodo de referencia (ER). Según Skoog et al. (2023), en esta técnica el EI responde selectivamente a la actividad de los iones hidronio (H^+), a través de la ecuación de Nernst, en cambio el ER mantiene su potencial de forma constante o estándar. Conforme a lo mencionado, la potenciometría ácido-base resulta ser especialmente útil cuando no es posible emplear indicadores visuales para medir con exactitud el pH del punto de equivalencia de una titulación, como por ejemplo en soluciones opacas o coloreadas.

Como propone Agreda, (2024), esta técnica también se puede aplicar mediante la implementación de electrodos metálicos conformados por aleaciones entre antimonio (Sn) y Plomo (Pb), que forman óxidos cuya respuesta es sensible al pH. Otros autores, como Camargo et al (s.f.), mencionan que de igual modo se pueden utilizar electrodos de vidrio combinado de Ag/AgCl, aunque para estos se requiere circuitos de alta impedancia. Esto significa que la elección del tipo de electrodo va depender de la precisión requerida y del tipo de titulación que se valla a poner en marcha, incluyendo si la misma solución es coloreada o transparente.

En la **Figura 3**, que se muestra a continuación se observa una celda para determinaciones potenciométricas. Sin embargo, hay que tener en cuenta que pocas veces se utiliza un electrodo de hidrógeno como electrodo de referencia para las mediciones potenciométricas cotidianas debido a que no es fácil de usar y mantener, y también debido al riesgo de incendio (Skoog et al., 2014).

Figura 3. Celda para determinaciones potenciométricas.



Nota. Tomado de Skoog, 2014, p. 536.

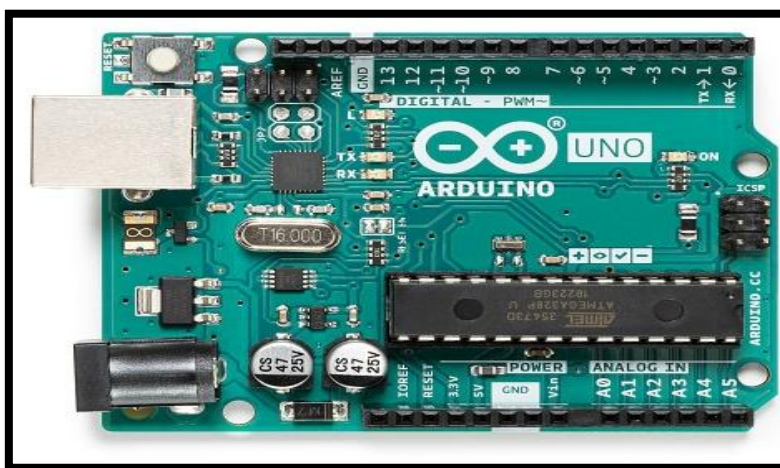
6.6 Arduino IDE

Arduino IDE, es un entorno de desarrollo de código abierto que permite programar placas electrónicas o microcontroladores como por ejemplo Arduino UNO, facilitando la lectura, procesamiento y conversión de señales analógicas en datos digitales. Según Hernández, (2020), este sistema puede ser integrado con sensores y circuitos de medición para registrar potenciales eléctricos asociados al pH de soluciones acuosas. Por medio de funciones de muestreo, calibración y visualización de datos. Es así como de cierta forma Arduino se convierte en una herramienta tecnológica accesible para la creación de instrumentos de análisis químico. Es así como entonces Hernández, (2020), resalta que esta plataforma junto con los circuitos, permite a estudiantes sin experiencia en informática y electrónica construir, diseñar y programar potenciómetros funcionales para las volumetrías ácido-base.

Conocer el pH de una solución es vital ya que puede seguir con mucha precisión la calidad del agua que se destina para la agricultura o piscicultura. Además, la aplicación de sensores de pH es gigante y se utiliza también en la producción química y petroquímica, en la industria farmacéutica, tratamiento de aguas residuales, etc. El proceso básico para la implementación se puede hacer en los siguientes pasos: Conectar el sensor de pH a Arduino, Leer datos, Interfaz del usuario, Automatización (Madruga, 2023).

A continuación, en la **Figura 4**, se muestra la placa de Arduino UNO, la cual se deberá tener en cuenta para la construcción base del sistema de medición de pH y ubicar los pines que serán utilizados en las conexiones con respecto al electrodo o sensor de pH a construir.

Figura 4. Placa de Arduino UNO.



Nota. Tomado de Madruga, 2023, p. 14.

Para su funcionamiento, la placa puede alimentarse mediante el cable USB o a través de una fuente de alimentación externa, como un transformador de pequeñas dimensiones o una batería de 9 V. El rango de voltaje recomendado se encuentra entre 6 y 12 V. Si la placa se alimenta con un voltaje inferior a 7 V, el regulador de 5 V puede suministrar un voltaje menor al requerido para su funcionamiento adecuado. Por otra parte, si el voltaje supera los 12 V, la placa puede sufrir daños debido al sobrecalentamiento de sus componentes (Madruga, 2023).

6.7 Python

Python constituye un lenguaje de programación de alto nivel, interpretado, multiparadigma y de propósito general, diseñado con el objetivo de facilitar la legibilidad del código y mejorar la productividad durante el proceso de desarrollo de software. Entre sus principales características se encuentran su sintaxis simple, estructura organizada y facilidad de aprendizaje, factores que han permitido su amplia adopción en diversos campos, incluyendo el desarrollo científico, la automatización, la inteligencia artificial y los sistemas educativos. Según la Python Software Foundation (2025), Python se caracteriza por mantener una sintaxis clara y una estructura flexible que facilita la

reutilización de componentes y la integración de herramientas especializadas para el desarrollo de aplicaciones. En el ámbito educativo, Python se ha consolidado como uno de los lenguajes de programación más utilizados debido a que reduce la complejidad sintáctica y permite a los estudiantes y desarrolladores enfocarse principalmente en la solución de problemas y en la construcción lógica de algoritmos.

De acuerdo con Zelle (2017), Python favorece el proceso de aprendizaje porque permite centrar la atención en el razonamiento computacional y no en las dificultades asociadas a la estructura del lenguaje, facilitando así la comprensión progresiva de conceptos fundamentales de programación. De manera complementaria, Downey (2015) sostiene que Python promueve el desarrollo del pensamiento computacional mediante estructuras simples y mecanismos intuitivos de programación que permiten construir soluciones de manera gradual. Estas características lo convierten en una herramienta adecuada para el desarrollo de software educativo y sistemas orientados a procesos de aprendizaje, debido a que facilita la implementación, mantenimiento y escalabilidad de aplicaciones. En consecuencia, la elección de Python para el desarrollo del presente proyecto resulta pertinente, dado que proporciona un entorno flexible y robusto para la construcción de aplicaciones, permitiendo integrar diferentes módulos, bibliotecas especializadas y herramientas de análisis que contribuyen al cumplimiento de los objetivos establecidos en la investigación.

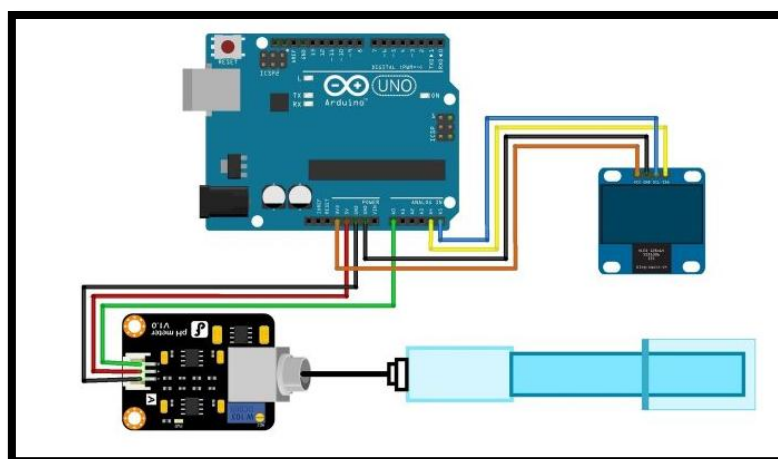
6.10. Implementación de Arduino en potenciometría ácido-base

Como lo menciona Hernández, (2021), la integración de Arduino en la potenciometría ácido-base ha permitido la construcción de prototipos o dispositivos de enseñanza accesibles y funcionales para la docencia y la investigación. Estos sistemas pueden involucrar tanto electrodos combinados de vidrio como electrodos metálicos, conectados a una interfaz de alta impedancia o también a circuitos analógicos que convierten y amplifican la señal para su adecuada lectura digital por Arduino (Hernández, 2021).

En este contexto, se han desarrollado distintos potenciómetros capaces de identificar puntos de equivalencia con exactitud, e incluso sistemas potenciostáticos para estudios más rigurosos. En síntesis, el uso de simuladores y módulos electrónicos diseñados por bloques han permitido que los estudiantes diseñen y programen sus propios instrumentos sin la necesidad de una formación previa en electrónica (Hernández, 2021).

En la **Figura 5**, se presenta la estructura del circuito, la cual se toma como diseño de referencia para la construcción del sistema de medición de pH. Sin embargo, es importante indicar que el sensor de pH Gravity con Arduino es el DFROBOT.

Figura 5. Circuito integrado.



Nota. Tomado de Hernández, 2021, p. 40.

Algunas ventajas de la implementación de este diseño es el bajo costo en la placa de Arduino, facilidad de programación con el código abierto, automatización y exactitud.

7 MARCO METODOLÓGICO

Este trabajo investigativo se desarrolló bajo el marco del grupo de Didáctica y sus Ciencias, en la línea de investigación titulada Interdisciplinariedad y química en contexto: una perspectiva experimental en la didáctica de la química, del Departamento de Química de la Universidad Pedagógica Nacional. Esta investigación se enfocó en caracterizar las habilidades de pensamiento crítico (Interpretación y análisis de problemas) orientado desde el modelo integrado del Thinking Classroom y las 7E en un grupo de PQF. En esta investigación, el análisis de la información se desarrolló a partir de las habilidades de pensamiento crítico propuestas por Facione (2011), operacionalizadas mediante sus respectivas sub-habilidades. Para la organización e interpretación de las evidencias obtenidas en los diferentes instrumentos se empleó la taxonomía SOLO de Biggs y Collis (2005), la cual permitió establecer el nivel de complejidad estructural del razonamiento alcanzado por los profesores en formación.

Las habilidades de pensamiento crítico propuestas por Facione (2011) se encuentran conformadas por un conjunto de sub-habilidades que representan procesos cognitivos diferenciados desde el punto de vista conceptual. Sin embargo, durante la resolución de situaciones problema estos procesos no operan de manera independiente, sino que interactúan de forma articulada en la construcción del razonamiento. En consecuencia, las evidencias obtenidas mediante los diferentes instrumentos reflejan la movilización simultánea de diversas sub-habilidades, lo que dificulta establecer límites absolutos entre ellas durante el proceso de análisis.

En coherencia con el enfoque cualitativo de la investigación y con el propósito de fortalecer las habilidades de pensamiento crítico en los PQF, el análisis no estuvo orientado a valorar de manera independiente cada una de las sub-habilidades propuestas

por Facione (2011). Por el contrario, las producciones resultantes de los PQF fueron examinadas de manera integral, identificando aquella sub-habilidad que presentó mayor evidencia y capacidad explicativa dentro de cada habilidad evaluada. Esta se asumió como referente analítico para interpretar el desarrollo de la habilidad correspondiente.

La selección de una sub-habilidad representativa para cada habilidad no implica que las demás estuvieran ausentes durante el proceso de resolución de las actividades. Por el contrario, se reconoce que todas contribuyeron de manera articulada a la construcción del razonamiento; sin embargo, debido a su naturaleza independiente, su análisis individual habría fragmentado la interpretación de las evidencias y generado reiteraciones sobre un mismo proceso cognitivo.

Finalmente, la interpretación de los resultados se realizó mediante la taxonomía SOLO (Biggs y Collis, 2005), la cual permitió establecer el nivel de complejidad estructural alcanzado por los PQF. Dado que esta taxonomía describe la calidad del aprendizaje como un todo y no el desempeño independiente de cada sub-habilidad, el análisis se centró en aquella que presentó mayor representatividad dentro de cada habilidad, favoreciendo una interpretación integral y coherente con el enfoque metodológico de la investigación.

7.1. Enfoque de investigación

Considerando previamente la revisión documental apropiada sobre la identificación de las habilidades de pensamiento crítico (interpretación y análisis de problemas), esta investigación se fundamentó a través de un enfoque cualitativo de diseño exploratorio-descriptivo, el cual implicó la recolección y análisis de datos de naturaleza cualitativa. Este enfoque se orientó a la comprensión de los fenómenos, explorándolos desde la perspectiva de los participantes en su ambiente natural y en relación con el contexto. (Hernández-Sampieri y Mendoza.2018).

7.2. Participantes

El presente trabajo investigativo se llevó a cabo con la participación de 15 profesores de química en formación (PQF), quienes cursaban entre octavo y décimo semestre del programa de la Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional. La selección de los participantes se realizó de manera voluntaria, en el marco del taller titulado “***Construcción de curvas de titulación potenciométricas ácido-base mediante una interfaz analógica-digital con Arduino Uno y la integración del software interactivo TitraCurve***”. Dicho taller se implementó con una intensidad horaria de cuatro horas por sesión, realizadas los días viernes y sábados durante el mes de marzo y abril del año 2026.

7.3. Fases de la investigación

El diseño metodológico de este trabajo investigativo se enfocó en caracterizar las habilidades de pensamiento crítico específicamente en interpretación y análisis de problemas propuestas por Facione, (2011), teniendo en cuenta la pregunta problema y los

objetivos planteados anteriormente. Para esto se estableció tres fases de investigación: fase de inicio, fase de desarrollo y fase de finalización como se observa en la **Figura 6**.

Figura 6. Fases de la investigación.



Nota. Autores (2026)

7.4. Fase de inicio: Fundamentación teórica y reconocimiento de las habilidades de pensamiento crítico

Esta fase tuvo como propósito fundamentar teóricamente la investigación y establecer un diagnóstico inicial de las habilidades de pensamiento crítico en un grupo de PQF. Por lo cual se estructuró en dos momentos: Levantamiento documental y Aplicación del Test de Halpern.

7.4.1. Levantamiento documental

En este apartado, se llevó a cabo la búsqueda precisa en las bases de datos como SciFinder, SpringerLink, ScienceDirect, Web of Science, Scopus, Taylor & Francis Online, Journal of Chemical Education, EBSCOhost, Dialnet, Scielo y Redalyc. Esta búsqueda se orientó a la identificación de elementos teóricos y metodológicos relacionados con las habilidades de pensamiento crítico, la aplicación del modelo integrado Thinking Classroom y las 7E, potenciometría ácido-base y la programación en el software Arduino IDE y Python, lo cual permitió orientar el planteamiento del problema de la investigación.

Esta indagación sustenta la elaboración de la secuencia didáctica que tiene como objetivo fomentar las habilidades de pensamiento crítico (interpretación y análisis de problemas) bajo el modelo integrado Thinking Classroom y las 7E.

7.4.2. Aplicación Test de Halpern

Este momento tuvo como propósito identificar el estado inicial las habilidades de pensamiento crítico en los PQF, de manera específica interpretación y análisis de problemas. Para ello, se empleó una adaptación del test diseñado por Halpern (2006), denominado *Halpern Critical Thinking Assessment Using Everyday Situations*, abreviado en sus siglas HCTAES, el cual permite evaluar el pensamiento crítico a partir de situaciones de la vida cotidiana, en este caso la temática de la potenciometría ácido-base, con el fin de contextualizar los contenidos abordados en la investigación (**Anexo 1**).

Este instrumento se estructuró en dos secciones, conformadas por un total de seis situaciones problema contextualizadas. La sección A estuvo orientada a evaluar la habilidad de interpretación mediante tres situaciones relacionadas con la identificación, comprensión e interpretación de fenómenos asociados al funcionamiento del sistema medidor de pH, la calibración del sensor y la interpretación de sucesos asociados al funcionamiento y la interpretación de los volúmenes de equivalencia en una valoración potenciométrica.

La sección B estuvo dirigida a valorar la habilidad de análisis, a partir de tres situaciones centrada en el análisis de razonamientos, la identificación de errores conceptuales, la evaluación de argumentos científicos fundamentados en contextos experimentales. Cada situación estuvo conformada por preguntas abiertas que promovían la argumentación escrita y una pregunta de selección múltiple con única respuesta, acompañada de su respectiva justificación, con el propósito de profundizar en los procesos de razonamiento de los PQF. Para el análisis de la información se establecieron dos categorías: Interpretación y análisis. Las respuestas obtenidas fueron clasificadas de acuerdo a los niveles de la Taxonomía de SOLO, permitiendo caracterizar el grado de complejidad estructural del pensamiento crítico evidenciado por los PQF.

Posteriormente, dicha adaptación fue sometida a un proceso de validación mediante juicio de expertos con el objetivo de garantizar la claridad, pertinencia, coherencia del instrumento en relación con los objetivos de la investigación (**Anexo 6**). Los resultados obtenidos en esta fase permitieron establecer el estado inicial de las habilidades de pensamiento crítico de los PQF, constituyéndose como referente para el desarrollo de la fase tres de implementación de la secuencia didáctica.

7.4.3. Fase de desarrollo: Diseño y construcción experimental del Software TitraCurve como interfaz del sistema medidor de pH.

En esta fase se realizó el diseño, construcción y validación experimental del Software TitraCurve integrado al sistema medidor de pH, desarrollado como una herramienta tecnológica para el análisis potenciométrico ácido-base en contextos de laboratorio escolar y universitario. El sistema fue construido mediante la integración de componentes electrónicos, programación integrada o embebida y desarrollo de software para la visualización y procesamiento de datos in situ.

La fase de desarrollo estuvo orientada a la construcción de un instrumento de medición basado en una técnica electroquímica, utilizando como fuente principal un microcontrolador de Arduino UNO R4 Mínima, una placa de alta impedancia o reguladora de voltaje y un sensor de pH DFRobot SEN0161-V2. Adicionalmente, se implementó un entorno computacional desarrollado en Python que permitió la adquisición, el procesamiento, la representación gráfica de la curva de titulación y el almacenamiento de los datos experimentales obtenidos durante la ejecución de la potenciometría ácido-base.

Desde el punto de vista metodológico, esta fase integró principios de instrumentación electrónica, análisis químico instrumental y programación aplicada a la educación científica. Asimismo, se articuló con el diseño de la secuencia didáctica fundamentada en el modelo integrado Thinking Classroom y las 7E, permitiendo que el Software TitraCurve no solo funcionará como un instrumento de medición, sino también como recurso pedagógico para fortalecer la comprensión de las curvas de titulación.

Es importante mencionar que esta fase, se estructuró en dos momentos principales para la construcción del Software TitraCurve:

- **Momento 1:** Diseño, construcción y validación del Software TitraCurve.
- **Momento 2:** Integración del Software TitraCurve con el hardware del sistema medidor de pH.

7.4.4. Diseño, construcción y aplicación del Software TitraCurve

El diseño del Software TitraCurve se desarrolló mediante una arquitectura modular compuesta por cinco módulos integrados, los cuales permitieron estructurar el proyecto desde los fundamentos teóricos de la potenciometría hasta la construcción tecnológica del aplicativo digital para la visualización y análisis de datos in situ. En la **Tabla 5** se describe los módulos y sus respectivas funciones en el sistema.

Tabla 5. Descripción y función de los módulos del sistema.

Módulo	Descripción	Función dentro del sistema
1	Fundamentos conceptuales de potenciometría ácido-base.	Establecer los principios químicos y electroquímicos de medición de pH.
2	Entorno Físico electrónico	Integrar sensores, Arduino UNO y circuitos de adquisición analógica.
3	Entorno computacional y digital	Procesar la señal analógica mediante Arduino IDE y Python
4	Diseño del software TritraCurve	Visualizar datos, almacenando datos y generando curvas de titulación.
5	Validación experimental	Aplicar el sistema medidor de pH integrado con el software en titulaciones potenciométricas in situ.

Nota. Autores (2026)

7.4.5. Módulo 1. Fundamentación conceptual de la potenciometría ácido-base

El Software TitraCurve se fundamentó en la técnica electroquímica de la potenciometría ácido-base, utilizada para determinar la variación del potencial eléctrico asociado a la concentración de iones hidronio (H_3O^+) presentes en una solución acuosa.

La potenciometría constituye una técnica instrumental ampliamente utilizada en química analítica debido a su precisión, sensibilidad y facilidad de implementación en procesos de titulación. En el presente proyecto, esta técnica permitió registrar el cambio de pH durante la adición gradual de un agente valorante sobre una muestra problema. El fundamento químico del sistema se basa en la siguiente ecuación de Nernst:

Ecuación 1:

$$E = E^{\circ} - \frac{RT}{nF} * \ln(K)$$

Donde:

E = Potencial medido.

n = Número de electrones transferidos.

E° = Potencial estándar.

F = Constante de Faraday

R = Constante de los gases

K = Cociente de reacción

T = Temperatura Absoluta

En el caso específico de un electrodo de pH, el potencial depende de la actividad de los iones hidronio o protones (H_3O^+ o H^+), por lo que K se reemplaza por $[H_3O^+]$. Además, para esta ecuación se consideró que el número de electrones transferidos (n) es igual a uno (1), puesto que la respuesta del electrodo estuvo asociada al intercambio de un ion hidronio por cada electrón en la interfase electroquímica de la membrana de vidrio. En este caso la ecuación que se tuvo en cuenta fue:

Ecuación 2:

$$E = E^{\circ} - \frac{RT}{nF} * \ln([H_3O^+])$$

Donde:

$[H_3O^+]$ = Concentración de iones hidronio o protones.

La relación entre potencial y concentración de iones hidronio permitió obtener experimentalmente el valor de pH mediante la siguiente expresión matemática:

$$pH = -\log [H_3O^+]$$

Aplicando propiedades de los logaritmos en la ecuación 2 queda de la siguiente manera:

Ecuación 3:

$$E = E^{\circ} + \frac{2,303 * RT}{F} * pH$$

Reemplazando los valores conocidos de la constante de los gases (R), temperatura absoluta (T) y constante de Faraday (F) todo en escala y condiciones estándar en la Ecuación 3 quedó de la siguiente manera:

$$E = E^{\circ} + \frac{(2,303) * (8,314) * (298,15)}{96485} * pH$$

$$E = E^{\circ} + 0,05916 * pH$$

Finalmente quedó una ecuación que relacionó los valores de voltaje expresados en milivoltios (mV) con cada cambio de pH. Esta última fue la que se requirió para lograr construir el Software TitraCurve, el cual se encargaría de registrar las mediciones de pH y construir la curva de titulación correspondiente al sistema ácido-base analizado.

Ecuación 4:

$$E_{(mV)} = E^{\circ} + 59,16 * pH$$

A partir de este principio se configuró el sistema de medición utilizando un electrodo de vidrio combinado conectado al sensor de referencia SEN0161-V2. Cabe resaltar que esta ecuación también fue clave en el módulo 3 para la calibración de este mismo.

7.4.6. Modulo 2. Entorno físico electrónico

El entorno físico electrónico correspondió al diseño del sistema de adquisición de señales potenciométricas. Este módulo permitió captar la señal analógica generada por el electrodo de pH y convertirla en información digital interpretable por el software. A continuación, en la **Tabla 6** se describen aquellos componentes que fueron utilizados para establecer todo el entorno físico del sistema medidor de pH integrado al Software TitraCurve:

Tabla 6. Componentes electrónicos del sistema medidor de pH.

Componente	Referente	Función
Microcontrolador	Arduino UNO R4 Mínima	Procesamiento para la adquisición y almacenamiento de la señal detectada
Placa reguladora	Chip integrado de circuito impreso PCB	Regulación del voltaje integrado para una alta impedancia de la señal

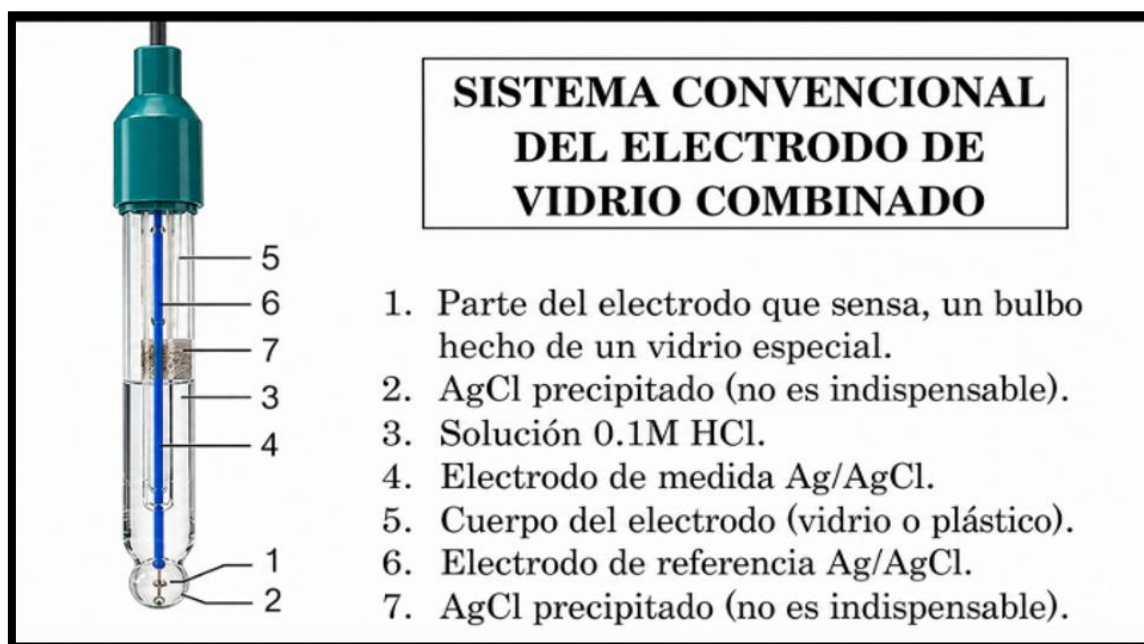
Placa decodificadora	Chip Analógico BNC DFRobot SEN0161-V2	Conversión de una lectura de milivoltios (mV) a una señal analógica estable y precisa.
Sensor de pH	DFRobot SEN0161-V2	Medición potenciométrica de pH en un sistema acido-base determinado
Electrodo	Electrodo de vidrio combinado	Detección de la concentración de H^+ en soluciones acuosas
Cable USB	USB tipo C	Comunicación serial Arduino-Computador para una óptima transferencia de datos
Cable Jumper	Jumpers Dupont	Interconexión entre el microcontrolador y la placa decodificadora.
Computadora Laptop	Equipo portátil Lenovo con Windows 11 Pro	Procesamiento de datos experimentales para la visualización de las mediciones.

Nota. Autores (2026)

7.4.7. Diseño del circuito electrónico

El sensor SEN0161-V2 fue conectado al Arduino UNO R4 Mínima, mediante una configuración analógica. El circuito eléctrico del sensor permitió acondicionar la señal proveniente del electrodo para posteriormente enviarla al decodificador analógico-digital (ADC) del microcontrolador Arduino UNO R4 Mínima. Cabe mencionar que el electrodo empleado es realmente un electrodo combinado, denominado así debido a que en una misma cápsula o membrana están contenidos el electrodo de referencia (ER1) y el electrodo indicador (EI), tal como se muestra en la **Figura 7**. El ER1 es un electrodo de Ag/AgCl. Mientras que, el EI consiste en: una solución de referencia que contiene una concentración constante de iones hidronio (H_3O^+), una membrana sólida de vidrio que separa la solución de referencia (interna) de la solución externa, que es aquella a la cual se le desea determinar el pH, y un electrodo de Ag/AgCl (ER2).

Figura 7. Esquema de un electrodo de vidrio combinado.



Tomado y adaptado Skoog, 2023. Autores (2026)

En la membrana de vidrio se lleva a cabo un proceso de intercambio iónico entre los iones H^+ presentes en las soluciones interna y externa, además del desplazamiento de los iones propios que constituyen el material de la membrana. Como resultado, se genera una diferencia de potencial de membrana que depende de la actividad de los iones H^+ tanto en el interior (a_i) como en el exterior (a_e). Esta diferencia de potencial de membrana, sumada al potencial correspondiente al electrodo de referencia ER2, conforma el potencial indicador. A su vez, la diferencia entre dicho potencial y el potencial del electrodo de referencia ER1 corresponde al potencial medio mediante el electrodo combinado, el cual mantiene una relación proporcional con el potencial E descrito en la ecuación 1.

En concordancia con lo anteriormente abordado, el sistema medidor de pH analógico-digital, está diseñado específicamente para medir el pH de una solución y evidenciar en un ordenador valores relacionados a su acidez o alcalinidad según corresponda. En este caso el electrodo de vidrio contiene un bulbo que actúa como sensor y está diseñado específicamente para ser selectivo a la concentración de iones hidronio (H_3O^+). Este mismo se encuentra ubicado en la parte inferior, garantizando precisiones en cada medición. A su vez se conecta con un chip regulador de voltaje integrado que admite un amplio rango de voltaje de 3,3 a 5,5 V para que la señal de salida filtrada por el hardware presente una baja fluctuación (jitter).

Adicionalmente, el sistema medidor de pH incluyó una placa de conversión de señal, también denominada transmisor, la cual se conectó al electrodo de vidrio o sonda de pH mediante un conector tipo BNC, lo que favoreció una transmisión estable de la señal electroquímica. La placa transmisora operó en una tensión de alimentación entre 3,3 y 5,5

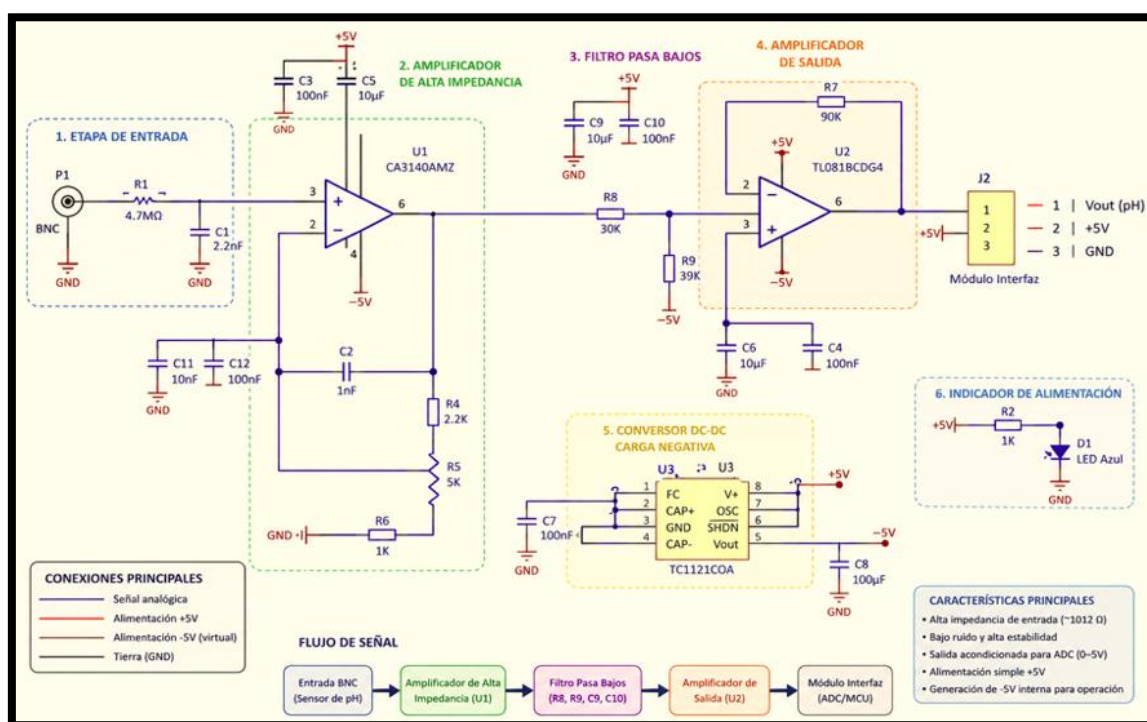
voltios (V) y proporcionó una señal de salida analógica en un rango de 0 a 3,0 Voltios (V), compatible con el sistema de adquisición de datos y el microcontrolador Arduino UNO R4 Mínima. Además, se evidencio una precisión de medición de $\pm 0,1$ unidades de pH a una temperatura de 25 °C, permitiendo obtener resultados confiables en condiciones de laboratorio. Por último, las dimensiones compactas de 42 mm x 32 mm del transmisor facilitaron la integración de los diferentes montajes experimentales.

7.4.8. Conexión y funcionamiento analógica-digital

En este apartado, se realizó la conexión del microcontrolador Arduino UNO R4 Mínima con una computadora portátil (laptop) mediante comunicación serial, utilizando un cable USB tipo C para la transferencia de datos y alimentación del sistema. Esta conexión permitió el envío en tiempo real de los valores de voltaje obtenidos por el sensor de pH hacia el entorno de programación de Arduino IDE y Python para su respectiva visualización en la interfaz del Software TitrCurve, facilitando el procesamiento, monitoreo y almacenamiento de la información experimental. En este orden de ideas, el sistema medidor de pH se estructuró a partir de la integración de la sonda de pH con la placa de conversión de señal mediante el conector BNC, encargado de transmitir la señal electroquímica generada por el electrodo de vidrio combinado. Posteriormente, la placa transmisora se enlazó con el Arduino a través del conector pH 2,0 -3P, estableciendo las conexiones de alimentación (VCC), línea de tierra (GND) y señal analógica (PO).

Complementariamente, la terminal VCC suministro la energía necesaria para el funcionamiento del módulo transmisor, mientras que la conexión GND estableció la referencia común del circuito eléctrico. Por su parte, la salida analógica PO transmitió al Arduino la señal de voltaje proporcional a la concentración de iones hidronio (H_3O^+) presente en los diferentes sistemas ácido-base analizados experimentalmente. El microcontrolador procesó dicha señal mediante su convertidor analógico-digital, permitiendo interpretar los valores de pH y transferirlos a la computadora portátil mediante comunicación serial. Esta configuración garantizó una adquisición de datos estable, precisa y adecuada para el desarrollo del sistema medidor de pH integrado. A continuación, en la **Figura 8**, se muestra una representación del entorno físico interno en función de las conexiones eléctricas de cada componente.

Figura 8. Representación gráfica de las conexiones del entorno físico interno.



Nota. Autores (2026)

Por último, la computadora portátil ejecutó el entorno Arduino IDE para la adquisición serial de datos y la programación del microcontrolador, mientras que el procesamiento, visualización y representación gráfica de la información experimental se desarrolló mediante el lenguaje de programación de Python durante la construcción del Software TitraCurve. Este software permitió interpretar en tiempo real o in situ los valores de pH obtenidos experimentalmente y representar en una interfaz de manera dinámica la curva de titulación potenciométrica ácido-base. De esta manera, el sistema implementado permitió registrar continuamente la variación del volumen de titulante añadido en el analito de interés, facilitando la identificación del punto de equivalencia y el análisis del comportamiento químico entre las especies químicas involucradas en el equilibrio ácido-base del sistema de estudio. A continuación, en la **Tabla 7**, se muestra la asignación de las conexiones realizadas:

Tabla 7. Asignación de conexiones en el sistema medidor de pH.

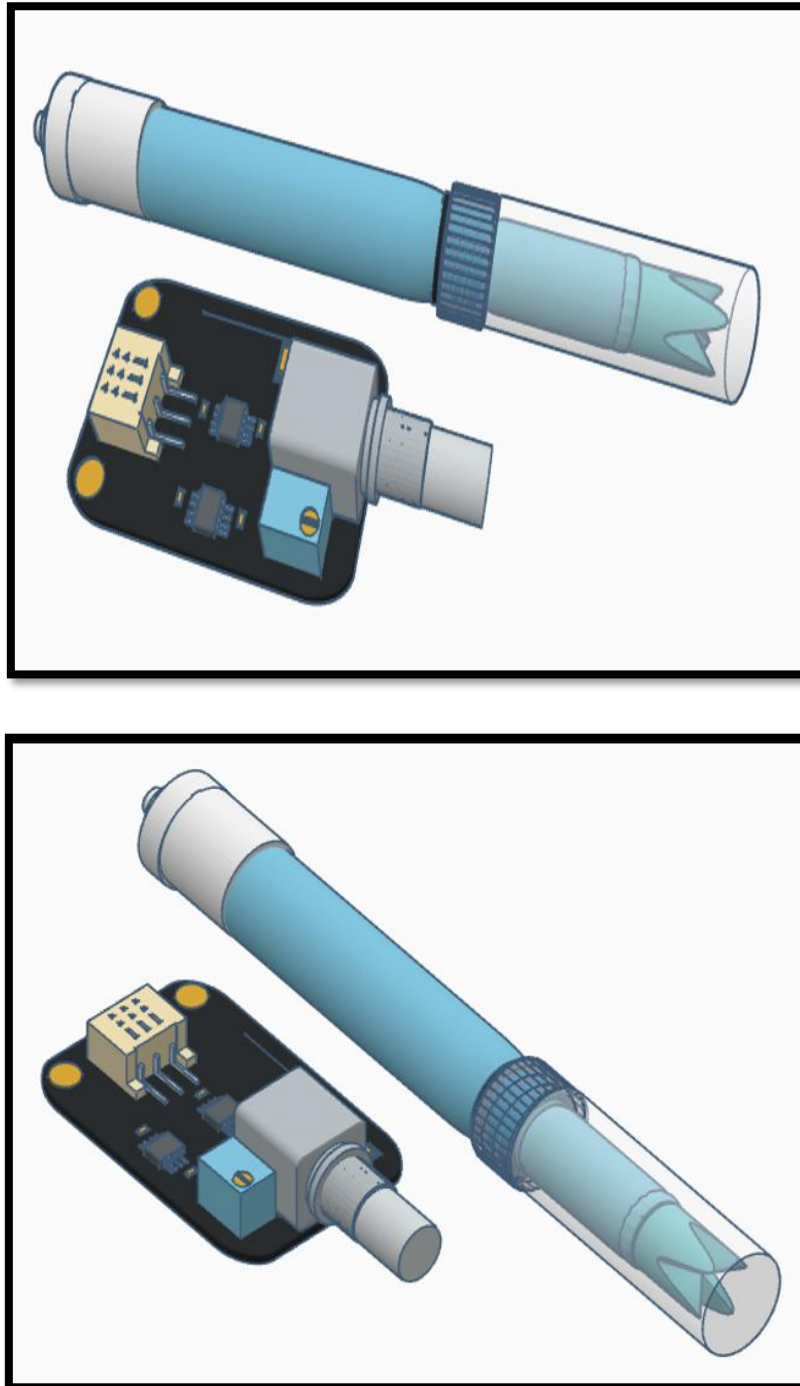
Pin del sensor	Conexión del microcontrolador
VCC	5V
GND	GND
PO (salida analógica)	A0

Nota. Autores (2026)

Es importante mencionar que la señal analógica obtenida osciló entre 0 y 5 voltios (V), permitiendo que el Arduino realizará conversiones digitales de 10 bits para interpretar el potencial asociado al pH. El Pin PO permitió transmitir la señal analógica

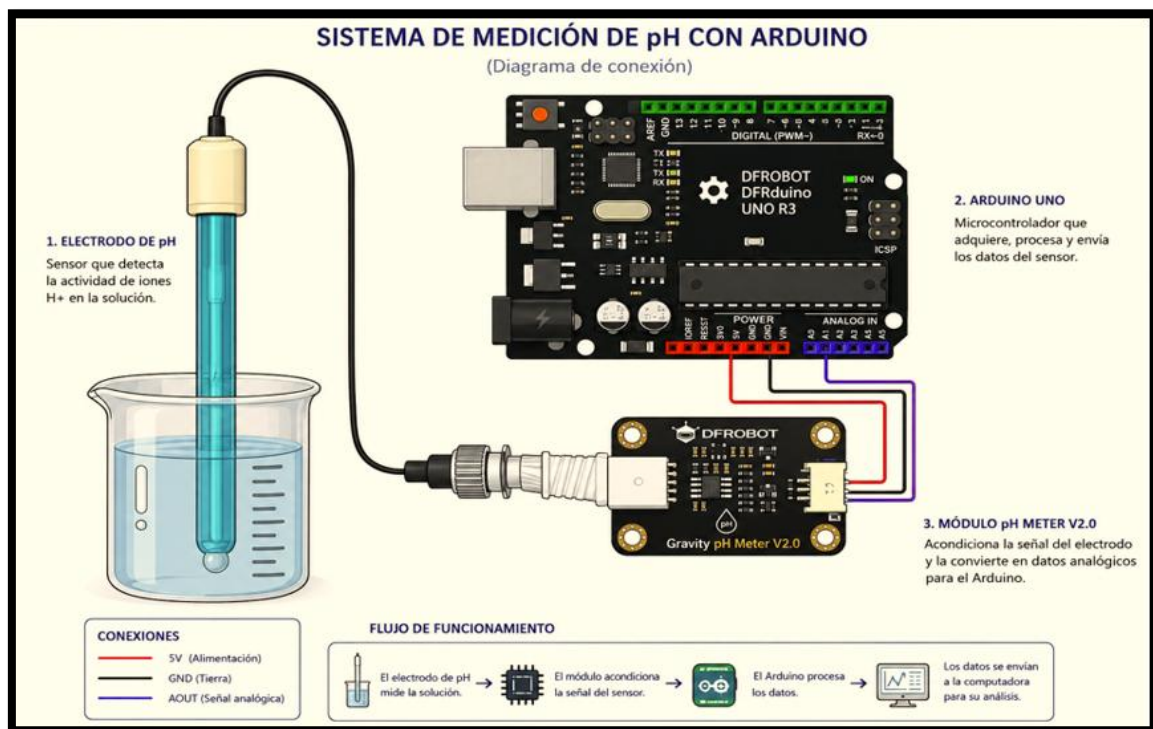
acondicionada hacia el convertidor analógico digital del Arduino (A0). En la **Figura 9** y **Figura 10**, se observa el modelo o maqueta 3D como finalmente quedaron las conexiones electrónicas del entorno físico.

Figura 9. Representación gráfica del electrodo y transmisor.



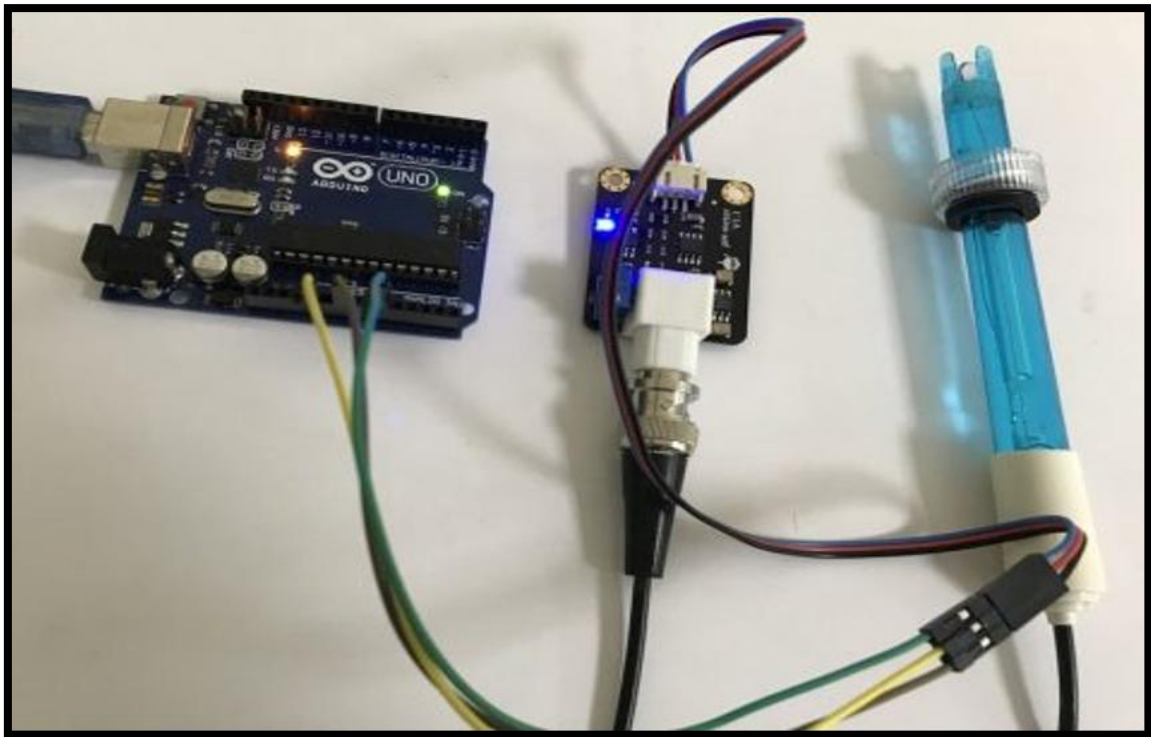
Nota. Autores (2026)

Figura 10. Representación gráfica de las conexiones del entorno físico externo.



Tomada y adaptada de DFRobot (2026)

Figura 11. Entorno físico externo real.



Nota. Autores (2026)

Como se muestra en la **Figura 11** el sensor o electrodo de pH se conectó a la placa decodificadora (PCB) por medio de una conexión BNC, esta placa a su vez poseía 3 pines que se conectaron a la placa de Arduino UNO R4 Mínima. Para ello, se realizó la primera conexión del pin VCC a 5V (cable jumper de color rojo), posteriormente se continuó con la segunda conexión de GND a GND (cable jumper de color negro). Por último, se conectó el pin analógico A0 al Arduino (cable jumper de color azul).

7.4.9. Modulo 3. Entorno computacional y digital

Este módulo correspondió al desarrollo de la arquitectura de programación necesario para el funcionamiento integral del Software TitrCurve y el sistema medidor de pH integrado. En este sentido el entorno computacional estuvo compuesto por dos niveles de programación:

1. Programación integrada o embebida en Arduino IDE.
2. Desarrollo de interfaz gráfica y procesamiento de datos en Python.

7.4.10. Programación en Arduino IDE

La programación integral o embebida permitió la adquisición continua de datos provenientes del sensor del pH. Por lo que, en la programación desarrollada en Arduino IDE, se definió inicialmente el pin analógico encargado de recibir la señal proveniente del sensor mediante la instrucción `</> C++ #define_SensorPin_A0`, la cual fue la base inicial para escribir el código fuente programable en el entorno Arduino IDE.

Esta declaración o asignación programable estableció que la señal analógica emitida por el módulo transmisor sería adquirida a través del pin A0 del microcontrolador. Debido a que la salida del sensor corresponde a un voltaje analógico proporcional al pH de la solución, el Arduino empleó su convertidor analógico-digital (ADC) interno para transformar continuamente dicha señal en datos digitales procesables computacionalmente. Posteriormente, se declararon las variables necesarias para el almacenamiento temporal, procesamiento estadístico y conversión de datos experimentales en la **Figura 12**, se muestra el código fuente que inicialmente se utiliza para establecer la internación del sensor de pH, el microcontrolador y la computadora portátil (laptop). Adicionalmente en la **Tabla 8** se expone a modo general las principales funciones del código fuente que se requirieron para la detección de la señal emitida, decodificada y procesada por el microcontrolador.

Figura 12. Código fuente inicial.

```
1 #define SensorPin A0 // the pH meter Analog output is connected with the Arduino's Analog
2 unsigned long int avgValue; //Store the average value of the sensor feedback
3 float b;
4 int buf[10],temp;
5
6 void setup()
7 {
8   pinMode(13,OUTPUT);
9   Serial.begin(9600);
10  Serial.println("Ready"); //Test the serial monitor
11}
12void loop()
13{
14  for(int i=0;i<10;i++) //Get 10 sample value from the sensor for smooth the value
15  {
16    buf[i]=analogRead(SensorPin);
17    delay(10);
18  }
19  for(int i=0;i<9;i++) //sort the analog from small to large
20  {
21    for(int j=i+1;j<10;j++)
22    {
23      if(buf[i]>buf[j])
24      {
25        temp=buf[i];
26        buf[i]=buf[j];
```

Nota. Autores (2026)

Tabla 8. Funciones principales del código Arduino.

Función	Descripción
Lectura Analógica	Captura la señal del electrodo de vidrio
Conversión ADC	Convierte voltaje en valor digital
Calibración	Ajusta la lectura según soluciones buffer
Comunicación serial	Envía datos al laptop en tiempo real
Muestreo continuo	Actualiza datos potenciométricos

Nota. Autores (2026)

La forma de procesamiento de la señal de potencial analógica de entrada y la señal de salida digital en el Arduino R4 Mínima, se configuró mediante un script de programación, que permitió inicialmente, obtener medidas digitales de potencial, temperatura y tiempo de análisis. El código se escribió en el software de desarrollo integrado Arduino IDE, versión 2,3,9. A continuación, en la **Figura 13**. Se muestra la interfaz inicial de la plataforma:

Figura 13. Interfaz de ejecución en Arduino IDE.



The screenshot shows the Arduino IDE interface. At the top, there's a toolbar with icons for checking, running, saving, and uploading. Below the toolbar is a tab labeled "Blink". The main text area contains the following C++ code:

```
// the setup function runs once when you press reset or power the board
void setup() {
  // initialize digital pin LED_BUILTIN as an output.
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
}

// the loop function runs over and over again forever
void loop() {
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  delay(1000);                     // wait for a second
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);  // turn the LED off by making the voltage LOW
  delay(1000);                     // wait for a second
}
```

Nota. Autores (2026)

Figura 14. Librería instalada en Arduino IDE para medición de pH.

```
/*
 * file DFRobot_PH.ino
 * @ https://github.com/DFRobot/DFRobot_PH
 *
 * This is the sample code for Gravity: Analog pH Sensor / Meter Kit V2, SKU:SEN0161-V2
 * In order to guarantee precision, a temperature sensor such as DS18B20 is needed, to execute automatic temperature compensation.
 * You can send commands in the serial monitor to execute the calibration.
 * Serial Commands:
 *   enterph -> enter the calibration mode
 *   calph   -> calibrate with the standard buffer solution, two buffer solutions(4.0 and 7.0) will be automatically recognized
 *   exitph  -> save the calibrated parameters and exit from calibration mode
 *
 * Copyright [DFRobot](http://www.dfrobot.com), 2018
 * Copyright GNU Lesser General Public License
 *
 * version V1.0
 * date 2018-04
 */

#include "DFRobot_PH.h"
#include <EEPROM.h>

#define PH_PIN A1
float voltage, pHValue, temperature = 25;
DFRobot_PH ph;

void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  ph.begin();
}
```

Nota. Autores (2026)

La programación del microcontrolador Arduino UNO R4 Mínima, se desarrolló mediante la instalación de la librería de DFRobot en Arduino IDE expuesta en la **Figura 14**, esta venía por default para la versión del sensor o electrodo de pH DFRobot SEN0161-V2. Es importante aclarar que este tipo de sensor está diseñado para pruebas o análisis de laboratorio químico in situ. Incorporando una estructura física que facilita su manipulación y conexión sin requerir procesos adicionales de soldadura. De igual manera, la librería proporcionó funciones del sensor, admitiendo un método de calibración de dos puntos con reconocimiento automático de soluciones buffer o estándar de pH 4,00 y 7,00, lo que permitió establecer condiciones iniciales confiables para la obtención de datos confiables.

A partir de estas características se realizaron modificaciones y adaptaciones sobre el código fuente original, con el propósito de adecuarlo a las funciones específicas y requeridas por el Software TitraCurve. Las modificaciones implementadas en el código programable permitieron efectuar lecturas continuas del sensor o electrodo, promediar múltiples lecturas para disminuir ruido electrónico en la ejecución, convertir señales

digitales en valores de voltajes, aplicar ecuaciones de calibración y transmitir información en tiempo real mediante comunicación serial, estableciendo un enlace directo entre el microcontrolador y el software desarrollado para el procesamiento y visualización de la información analizada.

7.4.11. Reconocimiento del microcontrolador

El reconocimiento del Arduino UNO R4 Mínima se realizó al establecer una conexión física mediante el puerto USB entre el microcontrolador y la computadora portátil (Laptop). Una vez conectado, el sistema operativo identificó automáticamente el dispositivo y asignó un puerto de comunicación serial, permitiendo el intercambio de información entre ambos componentes. Dentro del entorno Arduino IDE fue necesario seleccionar el modelo de tarjeta correspondiente y el puerto disponible, ya que estas configuraciones permitían identificar el dispositivo sobre el cual se cargaría el código programable desarrollado. Posteriormente, el código fuente fue compilado y convertido en código ejecutable para su carga y almacenamiento en la memoria interna del microcontrolador. Por último, se definió el pin analógico A1 como punto de entrada para la recepción de la señal eléctrica y se crearon variables encargadas de almacenar el voltaje medido, el valor de pH calculado y la temperatura utilizada para compensar posibles variaciones durante las mediciones en tiempo real o in situ. Estas variables permitieron establecer la estructura inicial necesaria para el funcionamiento adecuado del sistema medidor de pH integrado al Software TitraCurve.

Después del reconocimiento del microcontrolador en el entorno Arduino IDE para la adecuada comunicación con el sensor o electrodo, se creó un objeto de código denominado *pH*, perteneciente a la clase *DFRobot_pH*, el cual permitió acceder a los métodos de la librería encargados de procesar las mediciones y ejecutar funciones de calibración. La variable establecida como *temperature* se fijó con un valor de 25,0 °C, correspondiente a una temperatura de referencia utilizada por el sistema medidor de pH para efectuar compensación térmica cuando no se dispone de un sensor o sonda externa de temperatura. Esta configuración permitió que el sistema dispusiera de valores iniciales antes del inicio del proceso de adquisición de datos.

Establecidas estas variables, se procedió a definir las funciones para crear, compilar y probar el código diseñado para este proyecto. En este sentido la primera función se denominó *Setup()*, la cual correspondió a la etapa de inicialización del sistema y se ejecutó una sola vez durante el encendido del microcontrolador. En esta se configuró la comunicación serial mediante la instrucción *Serial.begin(115200)*, donde el valor definido representa la velocidad de transmisión de datos expresada en bits por segundo (bps), es decir, en baudios. Esta configuración permitió el intercambio de información entre el Arduino y la computadora portátil (Laptop) para visualizarla en el Software TitraCurve. Posteriormente se ejecutó *pH.begin()*, función encargada de iniciar los parámetros necesarios para el funcionamiento adecuado del sensor.

Por su parte, la función *Loop()* contenía el conjunto de instrucciones que se ejecutaron continuamente durante el funcionamiento del sistema medidor de pH.

Inicialmente se implementó una variable denominada *Timepoint*, utilizada junto con la función *Millis()* para controlar el tiempo entre mediciones y evitar lecturas innecesarias. El entorno Arduino IDE debido al código programable realizó una nueva lectura cada segundo mediante una comparación entre el tiempo transcurrido y el intervalo establecido. Este procedimiento permitió mantener una detección de señal óptima y una obtención de mediciones estables provenientes del sensor o electrodo de pH.

Una vez cumplido el intervalo definido, la instrucción *AnalogRead(pH_PIN)* realizó la captura de la señal analógica generada por el electrodo de pH. El valor obtenido correspondió a una representación digital de la señal eléctrica y posteriormente se convirtió en una medida de voltaje mediante una operación matemática que relacionó la resolución de lectura y el voltaje de referencia del microcontrolador. A continuación, la función *pH.readpH()* utilizó el voltaje calculado y el valor de temperatura previamente definido para traducir o transformar la señal eléctrica en una lectura o medida de pH compensada y comprensible para el Software TitrCurve.

Finalmente, el valor de pH calculado se transmitió mediante la instrucción *Serial.println(pHValue,2)* hacia el ordenador y el Software TitrCurve, donde el segundo parámetro indicó que el resultado sería mostrado o visualizado con dos cifras decimales. Adicionalmente, la función *pH.calibration()* permaneció activa durante la ejecución del programa y permitió realizar procedimientos de calibración mediante comandos enviados desde el monitor serial. Este proceso ajustó el comportamiento del sensor utilizando soluciones buffer o amortiguadoras conocidas y contribuyó a mejorar la precisión y confiabilidad de las mediciones realizadas. En la **Tabla 9**, se evidencia la descripción de las instrucciones y funciones que se implementaron en el código programable para el Arduino UNO R4 Mínima.

Tabla 9. Funciones principales del código programable en Arduino IDE.

Elemento o variable de sintaxis en el código programable	Función dentro del programa	Descripción de funcionamiento en el código programable
<code>#include "DFRobot_pH.H"</code>	Incorporación de librería	Incluyó las funciones necesarias para el procesamiento y calibración del sensor de pH DFRobot.
<code>#include <EEPROM.H></code>	Gestión de memoria	Permitió almacenar parámetros de calibración de forma permanente en la memoria inter del microcontrolador.
<code>#define pH_PIN A1</code>	Definición de entrada	Asignó el pin analógico A1 como punto de recepción de la señal proveniente del sensor.

<i>Float – voltaje</i>	Variable 1	Almacenó el valor de voltaje calculado a partir de lectura analógica.
<i>Float - pHValue</i>	Variable 2	Guardó el valor de pH obtenido después del procesamiento de la señal eléctrica traducida o codificada.
<i>Float – temperature=25</i>	Variable de referencia	Definió una temperatura inicial utilizada para la compensación térmica de las lecturas realizadas en tiempo real.
<i>DFRobot_pH – pH</i>	Creación de objeto	Generó una instancia que permitió utilizar funciones específicas de la librería del sensor o electrodo de pH.
<i>Setup ()</i>	Iniciación del programa	Ejecutó configuraciones iniciales una sola vez al encender el sistema medidor de pH.
<i>Serial.begin(115200)</i>	Comunicación serial	Configuró la velocidad de transmisión de datos entre el Arduino y el ordenador (Laptop).
<i>pH.begin()</i>	Iniciación del sensor	Activó los parámetros internos del sensor una vez conectado con el sistema medidor de pH para ser cargados en el código ejecutable.
<i>Loop()</i>	Ejecución continua	Repitió continuamente las instrucciones programadas en el entorno Arduino IDE, cada vez que se ejecutaba el código programable.
<i>Millis()</i>	Medición de tiempo	Funcionó como temporizador, obteniendo el tiempo transcurrido en milisegundos desde el inicio de la medición de pH.
<i>Timepoint</i>	Control temporal	Almacenó el instante de referencia (tiempo=0,00) para controlar el intervalo entre lecturas de pH.
<i>AnalogRead(pH_PIN)</i>	Lectura Analógica	Capturó la señal eléctrica enviada por el sensor conectado al pin A1 del microcontrolador.

<i>Voltage=analogRead()/1024*5000</i>	Conversión de señal eléctrica	Convirtió el valor digital leído del sensor o electrodo de pH a un equivalente en milivoltios.
<i>pH.ReadpH(voltage, temperature)</i>	Conversión de datos	Calculó el valor de pH a partir del voltaje y la temperatura suministrados en el código programable.
<i>Serial.println(pHValue,2)</i>	Envío de datos	Transmitió el valor calculado de pH en el monitor serial del entorno Arduino IDE mostrando dos cifras decimales.
<i>pH.calibration(voltaje,temperature)</i>	Calibración del sistema	Ejecutó el proceso de ajuste del sensor o electrodo de pH mediante dos soluciones buffer y comandos seriales.

Nota. Autores (2026)

A partir de la descripción presentada en la **Tabla 9**, se evidencia que las funciones implementadas en el entorno Arduino IDE para el código fuente adaptado constituyen la base operativa del sistema medidor de pH desarrollado. Asimismo, la correcta implementación de estos elementos y variables funcionales contribuyó a la automatización del proceso de obtención de información, reduciendo la intervención manual durante las mediciones y optimizando el intercambio de datos en tiempo real o in situ. Esto permitió que el Software TítroCurve actuará como una herramienta tecnológica capaz de recibir, interpretar y representar la información recopilada por el microcontrolador, favoreciendo una mayor precisión en el seguimiento y análisis de los resultados generados durante el proceso de titulación potenciométrica ácido-base.

7.4.12. Proceso de calibración

La calibración del electrodo de pH fue clave para obtener en el proceso de titulación lecturas o mediciones precisas y confiables. Debido a que los electrodos de pH generan señales eléctricas de diferencia de potencial, son susceptibles a variaciones asociadas al uso continuo, el envejecimiento o deterioro del sensor, las condiciones ambientales y las alteraciones fisicoquímicas de la membrana sensible de vidrio. Por esta razón, se requirió un procedimiento de ajuste previo que permitiera relacionar la señal detectada con valores de referencia conocidos. Este proceso permitió disminuir desviaciones entre los valores medidos y los valores reales, mejorando la estabilidad y precisión de las lecturas utilizadas durante el funcionamiento del sistema medidor de pH integrado al Software TítroCurve.

El procedimiento implementado se basó en las funciones incorporadas dentro del código programable de la librería *DFRobot_pH*, la cual integró un método de calibración de dos puntos mediante el reconocimiento automático de soluciones buffer o amortiguadoras de pH 4,00 y 7,00. Dicho procedimiento permitió determinar la relación entre la señal eléctrica producida por el electrodo y el valor de pH asociado a la solución

medida. La utilización de dos puntos de referencia permitió ajustar simultáneamente el desplazamiento y la pendiente de la respuesta del sensor, reduciendo errores acordes a la linealidad de las mediciones y mejorando la interpretación de las señales adquiridas por el microcontrolador.

La ejecución del procedimiento de calibración permaneció habilitada durante el funcionamiento del sistema medidor de pH integrado al Software TitrCurve mediante la instrucción `</> C++_pH.calibration(voltage,temperature)`. Esta función recibió como parámetros las variables *voltage* y *temperature*, correspondientes al voltaje calculado a partir de la lectura analógica y a la temperatura utilizada para la compensación térmica del sistema. El parámetro *voltage* fue obtenido a partir de la expresión `</> C++_voltage = analogRead(pH_PIN)/1024.0*5000`, donde la función *analogRead(pH_PIN)* realizó la lectura de la señal analógica proveniente del electrodo conectado al pin A1, mientras que la operación matemática permitió convertir la lectura digital en un valor equivalente de voltaje expresado en milivoltios (mV). Posteriormente, la librería empleó estos datos para calcular internamente los factores necesarios para el ajuste del sensor.

Adicionalmente en el código programable se incorporó la línea descriptiva `</> C++_// calibration porcess by Serial CMD`. Este comentario indicó que el proceso de calibración fue ejecutado mediante comandos seriales enviados desde el monitor serial del entorno Arduino IDE. El término *Serial CMD* hizo referencia a *Serial Commands*, es decir, instrucciones escritas o transmitidas por el usuario dentro de la interfaz mediante el canal de comunicación serial establecido entre la computadora portátil (Laptop) y el microcontrolador. La implementación de este mecanismo logró controlar las etapas del procedimiento sin modificar directamente la estructura del programa ni recompilar nuevamente el código ejecutado. A diferencia de una calibración automática completamente interna, este procedimiento requiere interacción directa del usuario durante el proceso de ajuste, permitiendo controlar cada etapa de calibración y verificar que el sensor se encuentre sumergido en la solución adecuada antes de almacenar los parámetros correspondientes.

El procedimiento inició mediante el envío del comando `</> C++_enterpH`, el cual activó el modo de calibración y habilitó al sistema para recibir instrucciones relacionadas con el proceso de ajuste. Una vez habilitado este modo, el electrodo fue sumergido inicialmente en la solución buffer o amortiguadora de pH 4,00, debido a que esta solución se utilizó como referencia central para establecer el primer punto base de calibración. Posteriormente se ejecutó el comando `</> C++_calpH`, mediante el cual, el código programable realizó el reconocimiento automático de la solución buffer a partir de la señal eléctrica obtenida y calculó los parámetros internos requeridos para el ajuste esperado.

Después de registrar la primera referencia, el mismo procedimiento fue repetido utilizando la solución buffer de pH 7,00, permitiendo incorporar un segundo punto de ajuste sobre la curva de respuesta del sensor. Una vez completadas las dos etapas de calibración, se ejecutó el comando `</> C++_exitpH`, mediante el cual, el sistema

medidor de pH integrado al Software TitrCurve finalizó el modo calibración y almacenó los parámetros obtenidos dentro de la memoria *EEPROM* del microcontrolador. El almacenamiento permanente de estos valores evitó la pérdida de información durante apagados o reinicios del sistema, permitiendo conservar los parámetros de ajuste para mediciones posteriores sin requerir una nueva calibración inmediata en la titulación potenciométrica ácido-base.

Con el fin de proporcionar una interpretación estructurada del proceso descrito, en la **Tabla 10**, se presenta la descripción de funciones, parámetros y comandos implementados durante la calibración del electrodo, indicando la función específica que desempeño cada elemento dentro de la ejecución del sistema medidor de pH.

Tabla 10. Elementos de código programable en el entorno de Arduino IDE.

Elemento de código	Función ejecutada	Descripción técnica
<i>// Calibration porcess by Serial CMD</i>	Comentario descriptivo	Indico que la calibración fue realizada mediante instrucciones enviadas por comunicación serial.
<i>EnterpH</i>	Activación de calibración	Inició el modo de calibración dentro de la librería y el código programable.
<i>CalpH</i>	Procesamiento de calibración	Ejecutó el reconocimiento y procesamiento de la solución buffer utilizada.
<i>ExitpH</i>	Finalización y almacenamiento	Guardó los parámetros calculados y cerró el modo de calibración
<i>EEPROM</i>	Memoria permanente	Almacenó los parámetros de calibración para reutilizarlos en futuras ejecuciones con el proceso de titulación
<i>Solución buffer pH 4,00</i>	Primer punto de referencia	Definió el valor de pH central utilizado durante el ajuste inicial del sensor.
<i>Solución buffer pH 7,00</i>	Segundo punto de referencia	Permitió determinar la pendiente de respuesta del electrodo.

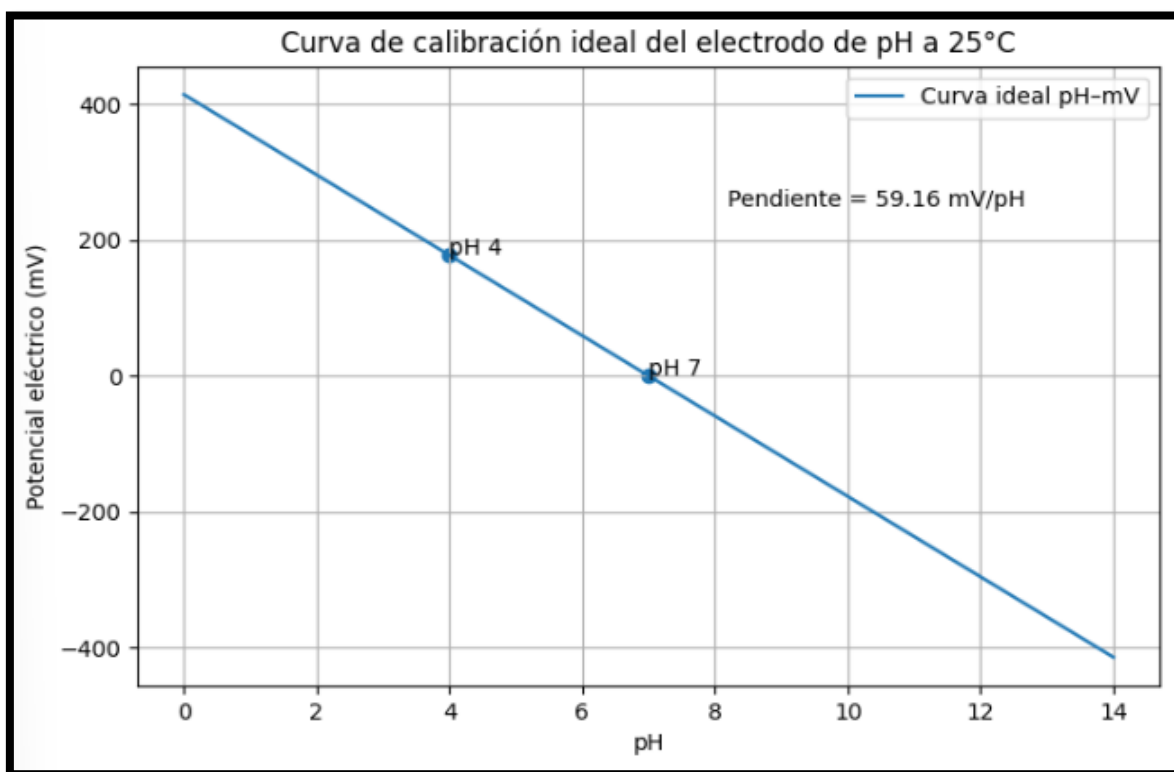
Nota. Autores (2026)

7.4.13. Curva de Calibración

La curva de calibración del electrodo de pH se empleó como un procedimiento de referencia para establecer la relación existente entre la señal eléctrica generada por el sensor y los valores reales de pH relacionados con las soluciones buffer conocidas. El comportamiento del electrodo se fundamentó en principios electroquímicos, debido a que la membrana sensible respondió a variaciones en la concentración de iones hidronio (H_3O^+) presentes en una solución. Como resultado de esta interacción, el electrodo generó una diferencia de potencial eléctrico expresada en milivoltios (mV), cuya magnitud varió proporcionalmente con los cambios de pH del medio analizado. Esta diferencia de potencial fue posteriormente amplificada y convertida en una señal analógica procesable por el microcontrolador. A partir de este comportamiento, se identificó una relación lineal entre los valores expresados como milivoltios con los valores de pH, logrando construir una curva de calibración que relacionó ambas variables.

La respuesta teórica del electrodo fue descrita mediante la ecuación de Nernst, la cual estableció que a $25,0\text{ }^\circ\text{C}$ el potencial eléctrico cambia aproximadamente $59,16\text{ mV}$ por cada unidad de pH, como se puede evidenciar en la **Figura 15**. Esto en otras palabras se definió como la pendiente de la curva de calibración y permitió establecer una referencia para comparar el comportamiento experimental del electrodo con respecto a la respuesta teórica esperada.

Figura 15. Curva de calibración ideal de pH a $25,0\text{ }^\circ\text{C}$.



Nota. Autores (2026)

La pendiente observada en la curva representa la sensibilidad teórica del electrodo, indicando la variación del potencial eléctrico generado por cada unidad de cambio de pH de la solución analizada. Esta relación constituyó un parámetro de referencia utilizado para evaluar el comportamiento experimental del sensor durante el procedimiento de calibración implementado en el código base de programación para el sistema medidor de pH integrado al Software TitrCurve.

A continuación, se muestra en la **Tabla 11**, la variación del voltaje en función del pH para una temperatura de 25,0 °C. La cual se tuvo en cuenta dentro de la librería y el código programable para la calibración del electrodo, cada vez que se realizará un proceso nuevo de titulación potenciométrica ácido-base.

Tabla 11. Relación lineal entre milivoltios y cambios de pH.

Valores de voltaje en función de los cambios de pH a 25,0 °C	
Valores de voltaje (mV)	Valores de pH
414,12	0,00
354,96	1,00
295,80	2,00
236,64	3,00
177,48	4,00
118,32	5,00
59,16	6,00
0,00	7,00
-59,16	8,00
-118,32	9,00
-177,48	10,00
-236,64	11,00
-295,80	12,00
-324,96	13,00
-414,12	14,00

Nota. Autores (2026)

Es importante mencionar que ningún sensor de pH puede alcanzar los voltajes teóricos, por lo tanto, fue necesario usar las soluciones buffer o amortiguadoras con concentraciones conocidas para calibrarlo. Como criterio de funcionamiento, se consideró aceptable una respuesta cercana al 85,0 % de la pendiente ideal, mientras que los valores inferiores evidenciaron deterioro del electrodo y la necesidad de reemplazarlo puesto que las condiciones reales de funcionamiento produjeron modificaciones sobre la respuesta de la membrana de vidrio. Según la **Tabla 11**, el voltaje cambio 59,16 mV por cada unidad de pH a 25,0 °C, con un valor de 0,00 mV en pH 7. En este sentido, aplicando la Ecuación 4 para corroborar dicha linealidad en la calibración del electrodo para el sistema medidor de pH se evidencio lo siguiente:

La ecuación de la recta es:

$$E_{(mV)} = b + mpH$$

Se calculó la pendiente:

$$m = \frac{(-414,12) - (414,12)}{(14,00) - (0,00)}$$

$$m = -59,16$$

Reemplazando en la Ecuación 4 se tiene ahora:

$$E_{(mV)} = E^{\circ} + (-59,16) * pH$$

$$E_{(mV)} = E^{\circ} - 59,16 * pH$$

Si se tomó como referencia que $E = 0$ y $pH = 7$, entonces:

$$0 = E^{\circ} - 59,16 * (7)$$

$$E^{\circ} = 414,12 \text{ mV}$$

Sustituyendo este valor:

$$E_{(mV)} = 414,12 - 59,16 * pH$$

Finalmente se despejó pH:

Ecuación 5:

$$pH = \frac{414,12 - E_{(mV)}}{59,16}$$

La ecuación 5 fue aquella que se utilizó como función estandarizada del código de programación para calibrar totalmente el sistema medidor de pH, con el objetivo de convertir la señal o lectura de voltaje expresada en milivoltios (mV) a unidades de pH. Por esta razón, siempre que se iniciaba una nueva titulación potenciométrica ácido-base se debía de calibrar primero y luego registrar cada medida obtenida del sistema analizado.

7.4.14. Desarrollo del Software TitraCurve en Python

El Software TitraCurve fue desarrollado utilizando el lenguaje de programación Python versión 3.14 siendo la serie de desarrollo oficial más nueva. Este lenguaje fue seleccionado debido a su versatilidad para el análisis científico-tecnológico, procesamiento de datos y construcción de interfases graficas. A continuación, en la **Tabla 12**, se enlistarán las librerías que fueron empleadas para el diseño del Software TitraCurve:

Tabla 12. Librerías y funciones ejecutables implementadas en Python.

Liberia implementada	Función ejecutable
Pyserial	Comunicación serial con Arduino
Tkinter	Desarrollo de interfaz gráfica
Matplotlib	Generación de curvas potenciométricas
NumPy	Procesamiento matemático

Pandas	Almacenamiento y exportación de datos
SciPy	Análisis de datos medibles

Nota. Autores (2026)

7.4.15. Arquitectura funcional software

El Software TitraCurve fue estructurado mediante una arquitectura secuencial de adquisición y análisis de datos. Para esto se tuvo en cuenta las siguientes etapas: Inicialización de comunicación serial entre el entorno Arduino IDE y Python, Recepción de datos provenientes del microcontrolador Arduino UNO R4 Mínima, Conversión de voltaje a unidades de pH, visualización numérica in situ, Representación gráfica de la curva de titulación, Almacenamiento de datos experimentales de la titulación potenciométrica ácido-base y determinación automática de la curva de titulación correspondiente al sistema ácido-base analizado.

7.4.16. Diseño de la interfaz gráfica

La interfaz gráfica fue diseñada bajo criterios de comprensibilidad, funcionalidad y facilidad de uso en contextos educativos. A continuación, en la **Tabla 13**, se evidencia los componentes o elementos con sus respectivas funciones que se necesitaron para la interfaz del Software TitraCurve.

Tabla 13. Componentes y funciones para la interfaz del Software TitraCurve.

Elemento visual en la interfaz	Función específica programable
Panel de conexión	Configuración del puerto serial
Visualizador de pH	Presentación numérica en tiempo real
Gráfico dinámico	Construcción automática de la curva de titulación
Registro experimental	Almacenamiento de datos registrados
Campos de información	Incorporación de datos del analito y valorante
Botón de exportación	Generación de archivos CSV

Nota. Autores (2026)

La interfaz también permitió ingresar manualmente como carácter alfanumérico las fórmulas químicas o los nombres de la solución valorante, solución valorada, concentración estimada del valorante y el volumen inicial del analito. Con el propósito de registrar aquella información pertinente a la titulación potenciométrica ácido base que se estuviera ejecutando en el laboratorio. Además, estos parámetros también facilitaron la organización de los ensayos experimentales y la trazabilidad de los resultados obtenidos en diferentes prácticas experimentales llevadas a cabo.

7.4.17. Representación gráfica de la curva de titulación

Uno de los principales aportes del Software TitraCurve fue la generación automática de las curvas potenciométricas ácido-base en tiempo real o in situ. Durante la titulación el sistema registró el volumen agregado de valorante, el volumen inicial del analito, el volumen total de la mezcla entre el ácido y la base, el tiempo de lectura, el registro de la lectura de pH medido por electrodo conectado al sistema medidor de pH y

del electrodo de referencia, el cual se encontraba conectado al potenciómetro del laboratorio de química de la Universidad Pedagógica Nacional. En este orden de ideas, la gráfica tuvo como propósito que el usuario logrará interpretar visualmente tres zonas, de pre-equivalencia, equivalencia y pos-equivalencia.

7.4.18. Almacenamiento y exportación de datos

Con el fin de garantizar la correcta conservación y disponibilidad de la información en cada titulación potenciométrica ácido-base. El Software TitrCurve incorporó funciones de almacenamiento automático en formato CSV, lo cual contribuyó en la consulta, exportación y acceso de la información del sistema ácido-base previamente analizado experimentalmente en el laboratorio de química de la Universidad Pedagógica Nacional. En la **Tabla 14**, se muestran algunas de las variables almacenadas por el Software TitrCurve:

Tabla 14. Variables y unidades visibles en la interfaz del Software TitrCurve.

Variable de almacenamiento	Unidad de medida
Tiempo	Segundo (s)
pH	Unidades de pH
Voltaje	Milivoltios (mV)
Volumen agregado	Mililitros (mL)
Temperatura experimental	Grados Celsius (°C)

Nota. Autores (2026)

La razón por la cual se planteó este tipo de archivo exportable fue porque se priorizó en que los archivos generados pudieran ser utilizados posteriormente en hojas de cálculo o software estadístico para análisis cuantitativos, como por ejemplo la aplicación del criterio matemático de la primera y segunda derivada para determinar los volúmenes y el pH en los puntos de equivalencia para el determinado sistema ácido-base analizado de manera experimental.

7.4.19. Entorno computacional y cargue de librerías

Como se había mencionado anteriormente, la primera etapa consistió en importar las librerías de Python necesarias para el funcionamiento del sistema medidor de pH integrado al Software TitrCurve. Cada una cumplió una función específica dentro de la arquitectura del software. En la **Figura 16**. Se puede evidenciar una reducida muestra de este primer cargue en el entorno programable de Python:

Figura 16. Código base de librerías instalables en Python.

```
main.py +
1 import serial
2 import tkinter as tk
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import pandas as pd
5 import numpy as np
6 from scipy.signal import savgol_filter
```

Nota. Autores (2026)

La librería *Serial* se utilizó para establecer la comunicación entre el Arduino y la computadora portátil (Laptop) mediante el puerto USB. Por su parte, *Tkinter* permitió diseñar la interfaz gráfica del usuario, mientras que *Matplotlib* proporcionó herramientas para la construcción dinámica de curvas potenciométricas. Las librerías *NumPy* y *Pandas* fueron implementadas para el procesamiento matemático y almacenamiento estructurado de los datos experimentales. Finalmente, la librería *SciPy* fue utilizada para el cálculo y suavización de señales experimentales, reduciendo el residuo asociado a la adquisición de datos.

7.4.20. Configuración de la comunicación serial

Posteriormente se estableció la comunicación serial entre el sistema medidor de pH y el Software TitraCurve, mediante el código programable que se evidencia en la **Figura 17**. En este caso la comunicación serial constituyó el mecanismo mediante el cual el sistema medidor de pH transmitió continuamente los datos adquiridos por el sensor de referencia DFRobot SEN0161-V2 hacia el software desarrollado. El puerto *COM* correspondió al canal de comunicación generado automáticamente por el sistema operativo del ordenador cuando el Arduino se conectaba mediante USB. La velocidad de transmisión fue configurada en *115200 baudios (bps)* permitiendo mantener estabilidad durante el intercambio de información. El parámetro *Timeout* estableció un tiempo límite de espera para evitar interrupciones durante la recepción de datos. Esta configuración garantizó la transferencia continua y estable de información experimental en tiempo real o in situ.

Figura 17. Fragmento de código programable para la conexión serial.

```
7 puerto = serial.Serial(
8     port='COM3',
9     baudrate=115200,
10    timeout=1
11 )
```

Nota. Autores (2026)

7.4.21. Recepción y lectura de datos

Una vez establecida la comunicación, se desarrolló un algoritmo encargado de recibir y procesar los datos provenientes del sensor o electrodo de pH. El código de programación permitió recibir los datos enviados por el Arduino en formato de texto. Inicialmente, la función *Readline()* capturó la información procedente del puerto serial. Posteriormente, el método *Decode()* transformó la secuencia de bytes en caracteres legibles para Python. La función *Strip()* eliminó espacios y caracteres adicionales presentes durante la transmisión. Finalmente, el método *Split()*. Codificó la información utilizando comas como delimitadores, permitiendo organizar las variables correspondientes al tiempo experimental, temperatura y valor de pH. Esta estructura facilitó el procesamiento posterior de los datos obtenidos durante las titulaciones potenciométricas ácido-base. En la siguiente **Figura 18**, se puede apreciar un pequeño fragmento de este código ejecutable.

Figura 18. Fragmento de código programable para la conexión interna y externa del sistema.

```
12  datos = puerto.readline()
13  datos = datos.decode('utf-8')
14  datos = datos.strip()
15
16  tiempo, temperatura, ph = datos.split(",")
Ln: 16, Col: 43
```

Nota. Autores (2026)

7.4.22. Almacenamiento de datos experimentales

Con el objetivo de conservar la información obtenida durante la titulación, se implementó un sistema de almacenamiento temporal de datos experimentales por cada titulación potenciométrica ácido-base ejecutada. En este sentido, se emplearon listas dinámicas debido a su capacidad para aumentar automáticamente su tamaño durante la adquisición de información. El método *Append()* facilitó incorporar nuevos valores a medida que el sistema recibía datos del Arduino. En la **Figura 19**, se puede observar un fragmento de este procedimiento que hizo posible construir una base de datos experimental continua y organizada, necesaria para generar curvas potenciométricas y realizar análisis posteriores.

Figura 19. Fragmento de código para el almacenamiento de datos experimentales.

```
17 tiempos=[]
18 temperaturas=[]
19 valores_ph=[]
20
21 tiempos.append(float(tiempo))
22 temperaturas.append(float(temperatura))
23 valores_ph.append(float(ph))
Ln: 23, Col: 29
```

Nota. Autores (2026)

7.4.23 Generación de la curva potenciométrica

La construcción automática de la curva de titulación constituyó una de las principales funcionalidades del Software TitrCurve. La representación gráfica dinámica permitió visualizar el comportamiento del pH durante el desarrollo experimental de la titulación potenciométrica ácido-base. La función *Clf()* eliminó gráficos previos evitando superposición de información. Posteriormente, la función *Plot()* construyó la relación entre el volumen agregado del valorante y pH medido en un determinado tiempo. Las funciones *Xlabel()* y *Ylabel()* añadieron etiquetas descriptivas a los ejes para facilitar la interpretación de resultados. Finalmente, *Draw ()* y *Pause ()* hicieron posible actualizar continuamente la gráfica conforme se incorporaban nuevos datos experimentales. Con este procedimiento se esperaba que se transformaran las mediciones potenciométricas en información visual de fácil interpretación con el usuario o el PQF en el mismo instante de la determinación. En la **Figura 20**, se puede apreciar un fragmento del código ejecutable en Python destinado para la generación gráfica esperada.

Figura 20. Fragmento de código para proporcionar curva de titulación.

```
24 plt.clf()
25 plt.plot(
26     tiempos,
27     valores_ph
28 )
29 plt.xlabel("Volumen adicionado de Valorante (mL)")
30 plt.ylabel("pH") and plt.ylabel("Tiempo (s)")
31 plt.draw("Curva de titulación")
32 plt.pause(0.01)
Ln: 20, Col: 1
```

Nota. Autores (2026)

7.4.24. Exportación automática de resultados experimentales

Finalmente, se implementó un sistema de exportación automática de resultados. En este orden de ideas, la exportación automática optimizó el almacenamiento de los datos experimentales en formato CSV, es decir en un archivo de texto plano que guardó todos los datos en forma de tabla con filas y columnas organizadas para su posterior análisis. La estructura *DataFrame* proporcionada por la *librería Pandas* facilitó la organización tabular de la información registrada durante la práctica experimental. Seguidamente, el método *To_csv ()* habilitó la generación de archivos compatibles con programas estadísticos y hojas de cálculo como Excel. Esta parametrización garantizó la conservación y trazabilidad de la información experimental obtenida mediante el sistema medidor de pH integrado al Software TitraCurve. A continuación, en la **Figura 21.** se muestra un fragmento del código ejecutable utilizado para la generación de los datos obtenidos en cada practica experimental in situ.

Figura 21. Fragmento de código programable para exportar resultados.

```

33 - datos=pd.DataFrame({
34
35     "Tiempo":tiempos,
36     "Temperatura":temperaturas,
37     "pH":valores_ph, Arduino,
38     "pH":valores_ph, Referencia,
39     "Volumen adicionado de valorante":valores_volumen,
40     "Volumen inicial del analito":valores_volumen,
41     "Curva de titaluación":valores_ph
42 })
43
44 datos.to_csv(
45     "Resultados_TitraCurve.csv"
46 )

```

Nota. Autores (2026)

De manera complementaria en la **Tabla 15.** Se muestra resumidamente algunos de los algoritmos utilizados en Python para el desarrollo completo del Software TitraCurve como evidencia de la arquitectura computacional del sistema.

Tabla 15. Algoritmos de código programable en la arquitectura del Software TitraCurve.

Modulo Funcional de código	Fragmento Programable	Función Computacional	Aplicación dentro del Software TitraCurve
Importación de librerías	<i>From _scipy, signal. Import _savgol_filte r</i>	Filtrado y suavización de datos	Redujo ruido experimental de señal
Recepción de datos	<i>Puerto.readline()</i>	Lectura serial	Capturó de datos experimentales

Conversión de datos	<i>Decode ('utf-8')</i>	Transformación de información	Convirtió de bytes a texto
Organización de variables	<i>Split (" , ")</i>	Separación de variables	Codificó tiempo, temperatura, volumen y pH
Conversión numérica	<i>Float (Number)</i>	Transformación de variables	Convirtió texto en datos numéricos
Pausa temporal	<i>Pause (Time)</i>	Visualización controlada	Mantuvo la estabilidad gráfica
Construcción gráfica	<i>Plt.plot()</i>	Representación visual	Generación de curvas de titulación
Filtrado matemático	<i>Savgol_filter ()</i>	Suavización de señales	Redujo el ruido del sensor
Derivación numérica	<i>Np.gradient()</i>	Cálculo matemático	Determinación de valores numéricos
Creación de estructura tabular	<i>Pd.DataFrame()</i>	Organización experimental	Construyó bases de datos
Exportación de datos	<i>To_csv()</i>	Generación de archivos	Guardó resultados experimentales
Almacenamiento local	<i>SQLite(sqlite3)</i>	Recuperación de sesiones	Conservo resultados experimentales

Nota. Autores (2026)

7.4.25. Modulo 4. Diseño del aplicativo para el análisis y procesamiento gráfico

Este módulo permitió transformar el Software TitraCurve en un aplicativo o Herramienta instalable en Windows, Linux y macOS para el análisis químico, específicamente para la técnica potenciométrica acido-base, la cual permitió analizar el comportamiento de cualquier sistema monoprótico o poliprótico según fuera el caso. En este sentido este software fue pensado para ahorrar tiempo en la elaboración de las curvas de titulación, visualizar datos en tiempo real, detectar cambios abruptos de pH, identificar zonas amortiguadoras, facilitar la interpretación experimental de las curvas de titulación y por último, pero no menos importante determinar el punto o los puntos de equivalencia con la ayuda de la exportación de datos, aplicando el criterio de la primera y segunda derivada en una hoja de cálculo de Excel. Es así como se esperaba que la representación gráfica y dinámica demostrará el análisis inmediato del comportamiento potenciométrico durante la titulación con la utilidad del sistema medidor de pH integrado al Software TitraCurve.

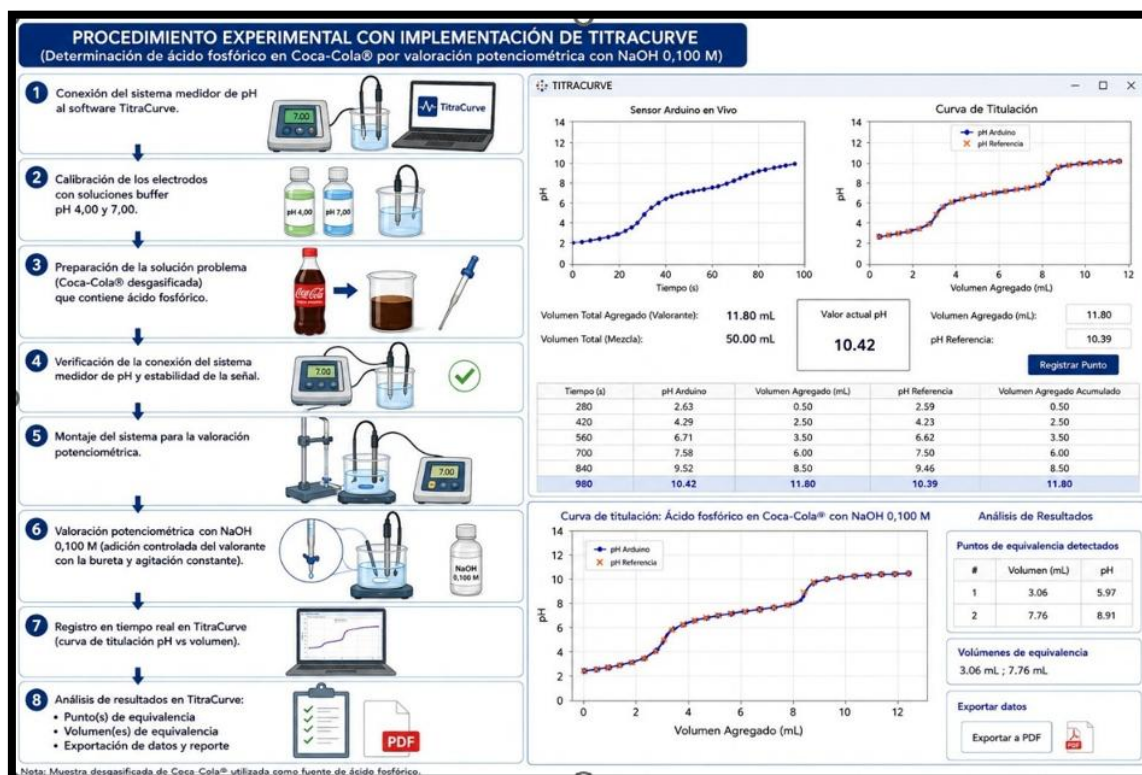
7.4.26. Módulo 5. Aplicación experimental del Software TitraCurve

La aplicación experimental se realizó mediante titulaciones potenciométricas ácido-base de un sistema monoprótico y otro poliprótico, utilizando soluciones patrón de carácter analítico, las cuales fueron previamente preparadas y estandarizadas en los laboratorios de química de la Universidad Pedagógica Nacional. (**Anexo 7**)

De igual manera, se optó por materiales de laboratorio químico como por ejemplo una bureta de 50,00 mL para la adición controlada del valorante, soporte universal para

el montaje experimental, vaso de precipitados para la contención de la muestra, agitador magnético para la homogeneización, soluciones buffer de pH 4,00 y 7,00 para la respectiva calibración de electrodos, balones aforados, pipetas aforadas y demás material de carácter volumétrico para las respectivas preparaciones del ácido acético (CH_3COOH) y ácido fosfórico (H_3PO_4) de grado comercial, los cuales participaron como analitos en diferentes determinaciones y asimismo se requirieron para su posterior valoración potenciométrica con hidróxido de sodio (NaOH) previamente estandarizado al 0,100 M. Finalmente, para el procedimiento experimental se llevó a cabo el siguiente proceso evidenciado en la **Figura 22**. En primer lugar, se conectó el sistema medidor de pH al software Titracurve; posteriormente, se realizó la calibración de los dos electrodos mediante las soluciones buffer; seguidamente, se preparó la solución problema y, por último, se efectuó la determinación potenciométrica de los analitos de interés en las muestras analizadas.

Figura 22 Esquema general de la aplicación experimental de Titracurve.



Nota. Autores (2026)

Finalmente, con el propósito de otorgar rigurosidad al proceso de aplicación experimental, la construcción del instrumento de validación (**Anexo 9**) tomó como referencia fundamentos metodológicos, relacionados con la evaluación de software educativo, calidad de sistemas interactivos y validación mediante juicio de expertos. Para ello se consideraron los criterios propuestos por Escobar y Cuervo (2008) para procesos de validación por expertos, la norma internacional ISO/IEC 25010, orientada a la evaluación de calidad de productos software, y marcos contemporáneos asociados a la

integración de tecnologías educativas descritos por UNESCO (2021) y Redecker (2020). La unión de estos referentes favoreció establecer dimensiones en una rúbrica de evaluación que trascendieran aspectos técnicos del sistema y posibilitaran analizar elementos pedagógicos y científicos de carácter químico relacionados con el contexto de la presente investigación.

La validación fue efectuada por Vanesa López, Ingeniera Química y Magíster en Ciencias de los Materiales, con más de 9 años de experiencia como profesional en ingeniería de procesos químicos, metrología, manufactura de semiconductores, instrumentación, análisis de datos y control de procesos en Intel Corporation, quien validó y expresó que el Software TitrCurve alcanzó un porcentaje global de cumplimiento del 96,7 %, correspondiente a un promedio general de 4,8 sobre 5,0. Este resultado permite establecer que, de acuerdo con la valoración realizada mediante el instrumento, el software presenta un nivel de cumplimiento sobresaliente frente a los criterios considerados para su validación. En el **Anexo 9** se muestra en detalle la aplicación de la rúbrica de evaluación.

7.4.27. Elaboración de la secuencia didáctica

La secuencia didáctica fue diseñada con énfasis en las estrategias del modelo integrado Thinking Classroom y las estrategias de las 7E. En este sentido, para cada actividad diseñada se describió los elementos correspondientes a cada una de estas metodologías, para el desarrollo de las habilidades de pensamiento crítico, interpretación y análisis de problemas.

Tabla 16. Estructuración de la secuencia didáctica.

Sesiones	Objetivo	Actividad	Estrategias del modelo integrado Thinking Classroom	Estrategia del modelo de las 7E
Sesión 1	Describir las curvas de titulación potenciométrica aplicadas a los equilibrios ácido-base en sistemas polipróticos.	Actividad # 1: Comprendiendo la potenciometría ácido-base: Relaciones conceptuales y procesos de titulación	Tipo de tareas usadas y ¿Cómo se dispone el mobiliario?	Enganchar y Elicitar
Sesión 2	Simular el funcionamiento de un sistema medidor de pH en TinkerCad	Actividad # 2: exploremos en Tinkercad, una aproximación del	¿Dónde trabajan los estudiantes?	Explorar y Extender

	para comprender la relación entre señal analógica y digital.	sistema medidor de pH.		
Sesión 3 y 4	Determinar por medio del Software TitraCurve la concentración de ácido fosfórico de una bebida cola.	Práctica de laboratorio: Determinación potenciométrica de ácido fosfórico en bebidas cola mediante la integración del Software TitraCurve	Grupo colaborativos y ¿Cómo se dispone el mobiliario?	Elaborar
Sesión 5	Comprende los resultados obtenidos de la práctica experimental mediante una articulación de conceptos en una UVE Heurística.	Actividad # 3 Elaboración de una UVE Heurística	Consolidación de una lección	Explicar

Nota. Autores (2026)

Teniendo en cuenta la **Tabla 16**, a continuación, se presenta el diseño de las actividades, en la que a medida que se desarrolló la secuencia de didáctica, se evidencia la articulación con uno o varios componentes del modelo integrado Thinking Classroom y las 7E.

7.4.28. Actividad # 1: Comprendiendo la potencimetría ácido-base: Relaciones conceptuales y procesos de titulación.

Se propuso una intervención educativa para abordar la potencimetría como técnica electroquímica. Asimismo, se construyó un modelo químico-matemático para la determinación del pH, fundamentado en el método moderno de los equilibrios ácido-base, con el fin de describir de manera rigurosa el comportamiento del sistema durante la valoración potenciométrica.

En el desarrollo de la Actividad # 1: Comprendiendo la potencimetría ácido-base: Relaciones conceptuales y procesos de titulación, se planteó que los PQF elaborarán, de forma individual, un mapa conceptual a partir de los conceptos abordados previamente. De manera complementaria, se diseñó una serie de preguntas relacionadas con un sistema potenciométrico ácido-base, cuya respuesta argumentada permitió la aplicación e

integración de los conocimientos construidos durante la actividad. Previo a la realización de la actividad, se verificó que los PQF conocieran en detalle tanto la estructura como la jerarquización de este recurso educativo, toda vez que es ampliamente utilizado durante su proceso de formación. Para reforzar los conocimientos al respecto y/o aclarar alguna duda se dio una breve inducción al respecto, asegurando que los posibles errores no fueran atribuibles a una mala gestión del recurso sino a fallas en el manejo de los conceptos químicos.

En relación con el modelo integrado del Thinking Classroom, se utilizó la estrategia tipos de tareas usadas, mediante la cual se propusieron actividades que favorecieron la interpretación el análisis y la argumentación de situaciones relacionadas con la potenciometría ácido-base, fortaleciendo el desarrollo de las habilidades de pensamiento crítico en los PQF. De igual manera, se propuso la implementación de la estrategia ¿Cómo se dispone el mobiliario?, orientada a romper con la organización tradicional de un salón de clases, generando espacios colaborativos y participativos entre los PQF. Finalmente, se incorporó la estrategia del modelo de las 7E, denominada Elicitar, la cual tuvo como propósito reconocer y activar los conocimientos previos de los PQF, facilitando la construcción de nuevos aprendizajes.

7.4.29. Actividad # 2: Exploremos en Tinkercad, una aproximación del sistema medidor de pH.

Complementando la intervención educativa anterior, se realizó la explicación sobre la articulación entre el hardware y el software de Arduino y Python. Posteriormente, se planteó el abordaje del funcionamiento del entorno virtual Tinkercad, el cual permitió una aproximación inicial al diseño del sistema medidor de pH integrado al Software TitraCurve. Asimismo, se implementó el desarrollo de una simulación del sistema en un entorno remoto.

De igual manera, se explicó la interpretación del respectivo código programable generado durante la aproximación inicial del sistema medidor de pH. En este sentido, también se planteó el abordaje de la estructura que compone la ejecución del circuito físico de carácter externo encargado de traducir una señal analógica a una digital. Cabe resaltar que, para esta fundamentación, se utilizó el software Arduino IDE y Python.

A partir de lo anterior, se implementó el desarrollo de la Actividad #2: Exploremos en Tinkercad, una aproximación del sistema medidor de pH, guiada por los docentes investigadores. En el desarrollo de la actividad, se indicó a los PQF que respondieran una serie de preguntas orientadas a lo practicado en el software Tinkercad y Arduino IDE.

En relación con el modelo integrado Thinking Classroom, se propuso la implementación de la estrategia ¿Dónde trabajan los estudiantes?, la cual consistió en utilizar espacios verticales para pensar, rompiendo con el uso tradicional de los cuadernos o libretas y favoreciendo el pensamiento activo en los PQF.

Adicionalmente, se integraron las estrategias Explorar y Extender del modelo de las 7E. La estrategia Explorar buscó que los PQF generaran y expresaran ideas a partir de

las actividades propuestas, favoreciendo la comprensión del tema; por su parte, la estrategia Extender tuvo como propósito transferir y aplicar el conocimiento adquirido en nuevos contextos, como la construcción de circuitos integrados en Tinkercad y la programación en C++ para la ejecución de estos mismos.

7.4.30. Práctica de laboratorio: Determinación potenciométrica de ácido fosfórico en bebidas cola mediante la integración del Software TitraCurve

La práctica de laboratorio se inició con la aplicación de la estrategia de grupos colaborativos del modelo integrado Thinking Classroom, mediante la organización aleatoria de los grupos de trabajo, con el fin de facilitar la cooperación, el pensamiento abierto y la integración de los PQF.

La práctica se orientó a la determinación de ácido fosfórico en diferentes bebidas cola de carácter comercial, de modo que cada grupo tuvo asignada una muestra específica. Previamente al desarrollo experimental, se realizó la revisión de cálculos teóricos con el fin de garantizar la comprensión del procedimiento y seguidamente, se estableció que los PQF serían responsables de construir la curva de valoración correspondiente a las siguientes muestras problemas:

- **Grupo 1:** Coca-Cola.
- **Grupo 2:** Pepsi-Cola.
- **Grupo 3:** Big-Cola.
- **Grupo 4:** Pow-Cola.

Posteriormente, se indicó que los grupos midieran el pH inicial de la muestra problema y, luego, realizaran la valoración, registrando los valores de pH antes, durante y después del punto de equivalencia, utilizando el Software TitraCurve integrado al sistema medidor de pH y el potenciómetro de referencia, con el fin de obtener la respectiva curva de valoración en paralelo con ambos electrodos en tiempo real o in situ.

En relación con el modelo integrado Thinking Classroom, se implementó una segunda estrategia ¿Cómo se dispone el mobiliario?, que consistió en romper con la organización tradicional de un salón de clases, generando espacios colaborativos y participativos entre los PQF. Finalmente, con base en las estrategias del modelo de las 7E, se incorporó Elaborar, cuyo propósito fue favorecer la aplicación e integración de los conceptos trabajados previamente mediante la resolución de preguntas y problemas relacionados con la actividad experimental.

7.4.31. Actividad # 3 Elaboración de una UVE heurística

En relación con la práctica de laboratorio, los PQF intervinieron compartiendo los resultados obtenidos. Seguidamente, un representante de cada grupo pasó al tablero, indicando el proceso realizado durante la práctica, la muestra asignada, así como los resultados esperados y obtenidos, considerando el cálculo teórico y experimental.

Adicionalmente, como productos de laboratorio, elaboraron una UVE heurística y una hoja de cálculo en Excel con los cálculos realizados, en la cual evidenciaron los

puntos de equivalencia hallados para el sistema ácido-base por medio de la aplicación del criterio de la primera y segunda derivada. De igual manera, determinaron la concentración en molaridad (M) y en partes por millón (ppm) del ácido fosfórico presente en cada bebida cola de estudio. Es importante señalar que, en esta intervención, se proporcionó el espacio necesario a los PQF para que culminarán los dos productos entregables con el acompañamiento de los docentes investigadores.

Con respecto al modelo integrado Thinking Classroom, se implementó la estrategia consolidación de una lección, la cual favoreció la participación de los PQF y la puesta en común de los aspectos que generaron mayor dificultad, permitiendo construir de manera colectiva el cierre y la conclusión de la actividad propuesta. En el caso del modelo de las 7E, se incorporó la estrategia Explicar, la cual se relacionó con la retroalimentación, ya que los docentes investigadores utilizaron la terminología disciplinar referente a la potenciometría ácido-base, con el fin de que los PQF reforzarán y complementarán los resultados obtenidos durante su proceso de exploración.

La secuencia didáctica y los instrumentos diseñados en este apartado fueron sometidos a un proceso de validación mediante juicio de expertos (**Anexo 6**), con el propósito de valorar su claridad, pertinencia y coherencia con los objetivos de la investigación. En este proceso participaron dos expertos: Robert Prieto, Licenciado en Química, Magíster en Educación y las TIC, docente de Química con 15 años de experiencia; y Katherine Ambrosio, Licenciada en Química, Magíster en Educación, docente de Ciencias Naturales y Química, con 8 años de experiencia. Como resultado de la valoración, ambos emitieron un dictamen de “Validado”, avalando su aplicación en la investigación.

7.5 Fase de finalización: Implementación y evaluación de la secuencia de actividades.

En esta fase de la investigación, se culminó el proceso de la intervención pedagógica y metodológica. En esta fase se integraron y consolidaron los resultados obtenidos a lo largo de la aplicación de la secuencia didáctica, lo que permitió caracterizar el desarrollo de las habilidades de pensamiento crítico, específicamente la interpretación y el análisis de problemas en los PQF. En relación con los objetivos planteados, esta fase se orientó a la aplicación de la prueba de salida, correspondiente al mismo instrumento utilizado como diagnóstico o pre-test en la fase de inicio.

Este permitió contrastar el estado inicial de las habilidades de pensamiento crítico, identificadas previamente, con el estado final. Este proceso permitió establecer comparaciones de carácter interpretativo entre ambos momentos, antes y después de la intervención didáctica, la cual estuvo fundamentada bajo las estrategias del modelo integrado Thinking Classroom y las 7E. Asimismo, se realizó el análisis de los datos recolectados durante toda la secuencia didáctica, incluyendo los productos generados en la práctica de laboratorio y la implementación del Software TitraCurve. Dicho análisis permitió evidenciar la incidencia de las variables pedagógicas y tecnológicas en la construcción de aprendizajes relacionados con la potenciometría ácido-base. Para la

evaluación de las habilidades de pensamiento crítico, se construyó una rúbrica basada en la Taxonomía SOLO la cual permitió caracterizar las habilidades de interpretación y análisis de problemas en cada producción de los PQF.

A continuación, se presenta la rúbrica evaluativa en la **Tabla 17**, en la cual se integran las habilidades de interpretación y análisis de problemas con su respectiva sub-habilidad y nivel de la Taxonomía SOLO. Se omitió el primer nivel correspondiente al nivel preestructural de la taxonomía SOLO, debido a que este nivel hace referencia a que los estudiantes carecen de comprensión, sin embargo, los PQF cuentan con fundamentos conceptuales previos de la temática de la potenciometría ácido-base provenientes de su formación académica como licenciados en química.

Tabla 17. Rúbrica evaluativa para la caracterización de las habilidades interpretación y análisis de problemas según los niveles de la Taxonomía SOLO.

HABILIDADES DE PENSAMIENTO CRÍTICO		NIVELES DE TAXONOMÍA SOLO			
HABILIDAD	SUB-HABILIDAD	UNIESTRUCTURAL	MULTIESTRUCTURAL	RELACIONAL	ABSTRACTO AMPLIADO
Interpretación	Categorizar información	Identifica un elemento aislado (pH, volumen, especie química o señal del sensor) sin distinguir su relevancia.	Reconoce variables (pH, punto de equivalencia, especies ácido-base o datos del sensor), pero las describe de forma fragmentada sin integración.	Organiza variables del sistema (pH, volumen, Q_a , K_a , especies, respuestas del sensor, equilibrio ácido-base).	Reestructura la información generando modelos explicativos que integran datos experimentales (Arduino) y teóricos (Curvas de valoración).
	Decodificar significados	Reconoce parcialmente elementos en gráficas de titulación o datos de pH.	Describe gráficas de titulación, tablas o datos del Arduino sin profundidad conceptual.	Interpreta curvas de valoración integrando representaciones (gráficas, datos, modelo químico matemático)	Interpreta críticamente las representaciones identificando implicaciones, errores del sensor o limitaciones del modelo.
Análisis	Examinar ideas	Reconoce un concepto aislado (pH, neutralización o sensor).	Identificar varios conceptos (equilibrio, potenciometría, programación) presentes en el problema de estudio.	Relaciona conceptos químicos y tecnológicos para explicar el sistema de medición.	Examina los argumentos científicos que sustentan el modelo químico-matemático, estableciendo comparaciones, contrastes y posibles explicaciones alternativas.

	Identificar argumentos	Identifica razones que expliquen los resultados obtenidos.	Reconoce algunas explicaciones (puntos de equivalencia, concentración, etc..)	Relaciona datos experimentales con fundamentos teóricos.	Analiza críticamente los argumentos considerando precisión del sensor, errores experimentales y modelo químico.
	Analizar argumentos	Distingue entre datos, cálculos o conclusiones.	Reconoce algunos elementos del razonamiento (datos, premisas o conclusiones) pero sin integrarlos.	Relaciona datos experimentales, cálculos y teoría para explicar la curva de valoración.	Construye argumentos sólidos integrando evidencia experimental, modelación química y programación.

Nota. Autores (2026)

7.6 Criterios de calidad de la investigación

En la presente investigación se tuvieron en cuenta tres criterios de calidad: creabilidad, confirmabilidad y transferibilidad. El primero corresponde a la creabilidad, la cual se alcanzó mediante la implementación de diferentes instrumentos de recolección de información aplicados durante las distintas fases de la investigación, entre el test de Halpern adaptado, los mapas conceptuales, las actividades desarrolladas en la secuencia didáctica fundamentada en el modelo integrado Thinking Classroom y las estrategias de las 7E, la práctica experimental de la potenciometría ácido-base con el sistema medidor de pH y el software TitrCurve, así como la elaboración de la UVE heurística.

La información obtenida permitió caracterizar las habilidades de pensamiento crítico de interpretación y análisis de problemas de los PQF mediante una rúbrica de evaluación construida a partir de la Taxonomía SOLO, cuyos resultados fueron posteriormente integrados a través de la metodología de la pirámide de alcance, favoreciendo la consistencia en la interpretación de los hallazgos. Cabe mencionar que la recopilación de la información fue tratada de manera confidencial y utilizada exclusivamente con fines académicos e investigativos. Para ello, antes del desarrollo de la investigación, todos los PQF diligenciaron el correspondiente consentimiento informado (**Anexo 5**), garantizando el anonimato y el uso responsable de la información. Este criterio se fortalece cuando el investigador contrasta y verifica continuamente los hallazgos obtenidos a partir de las diferentes evidencias recopiladas durante el proceso investigativo (Castillo & Vásquez, 2003).

El segundo criterio de calidad corresponde a la confirmabilidad, la cual buscó garantizar que los resultados obtenidos estuvieran sustentados en las evidencias recolectadas durante la investigación y no en apreciaciones subjetivas de los investigadores. En este sentido, los instrumentos implementados respondieron a los objetivos planteados en el estudio y permitieron recopilar información suficiente para analizar las habilidades de pensamiento crítico de interpretación y análisis de problemas. Posteriormente, las producciones académicas elaboradas por lo PQF fueron analizadas mediante una rubrica de evaluación fundamentada en la Taxonomía SOLO, que permitió clasificar el desempeño evidenciado en cada actividad. Asimismo, los resultados obtenidos fueron respaldados mediante tablas, porcentajes de clasificación, representaciones gráficas y la metodología de la pirámide de alcance, además de contrastarse permanentemente con la literatura relacionada con el pensamiento crítico, el modelo integrado Thinking Classroom y las estrategias de las 7E y la enseñanza de la química, respetando la citación de las fuentes consultadas (Noreña et al., 2012).

Finalmente, el tercer criterio considerado fue la transferibilidad, entendida como la posibilidad de que los resultados obtenidos constituyan un referente para investigaciones desarrolladas en contextos educativos con características similares. Ese criterio se favoreció mediante la descripción detallada del contexto de la investigación, de las características de los PQF, de la secuencia didáctica implementada, de las estrategias del modelo Thinking Classroom y las 7E, de los instrumentos de recolección

de información y del procedimiento de análisis basado en la Taxonomía SOLO y la pirámide de alcance. Esta descripción proporciona elementos suficientes para que otros investigadores puedan comparar los resultados obtenidos con estudios desarrollados en contextos semejantes y valorar la pertinencia de adaptar la propuesta metodológica a otros escenarios educativos (Noreña et al., 2012). En conclusión, la **tabla 18** presenta la metodología implementada en la investigación.

Tabla 18. Metodología implementada en la investigación.

Pregunta de investigación	Objetivos	Diseño metodológico	Técnicas de recolección de información	Análisis de la información	Criterios de calidad
¿Cómo el modelo integrado Thinking Classroom y las estrategias de las 7E en una secuencia de actividades promueve las habilidades de pensamiento crítico, interpretación y análisis de problemas, en un grupo de profesores de química en formación, cuando se aborda la técnica potenciométrica ácido-base para la construcción de curvas de valoración a través de un sistema medidor de pH basado en Arduino UNO y su integración con el Software TitraCurve?	Objetivo general: Analizar los alcances del modelo integrado Thinking Classroom y las estrategias de las 7E en la promoción de habilidades de pensamiento crítico, interpretación y análisis de problemas en un grupo de profesores de química en formación, mediante el uso de la técnica potenciométrica para la construcción de curvas de titulación ácido-base a través de un sistema medidor de pH basado en Arduino UNO y su integración con el Software TitraCurve.	Enfoque: Cualitativo. Alcance: Descriptivo. Diseño: Secuencia didáctica fundamentada en el modelo integrado Thinking Classroom y las estrategias de las 7E. Participantes: Profesores de química en formación. (PQF) Categorías de análisis: Interpretación y análisis con sus respectivas sub-habilidades propuestas por Facione (2011).	Instrumento diagnóstico: Test de Halpern adaptado (prueba de entrada). Instrumentos durante la implementación: Actividades de la secuencia didáctica, mapa conceptual, práctica experimental de potencimetría ácido-base con el sistema medidor de pH y el software TitraCurve, y UVE heurística. Instrumento final: Test de Halpern adaptado (prueba de salida).	La información recopilada se analizó mediante una rúbrica de evaluación fundamentada en la Taxonomía SOLO, la cual permitió clasificar el nivel de complejidad de los profesores en formación (PQF) en las habilidades de interpretación y análisis. Posteriormente, los resultados fueron integrados mediante la pirámide de alcance, favoreciendo la caracterización del desarrollo alcanzado en cada sub-habilidad del pensamiento crítico.	Credibilidad: Se garantizó mediante la triangulación de evidencias obtenidas a partir del Test de Halpern adaptado, los mapas conceptuales, las actividades de la secuencia didáctica, la práctica experimental, la UVE heurística y la prueba de salida, analizadas mediante la rúbrica fundamentada en la Taxonomía SOLO. Confirmabilidad: Se aseguró mediante la organización sistemática de las evidencias, la clasificación del desempeño con la rúbrica basada en la Taxonomía SOLO, el análisis a través de la pirámide de alcance y el contraste permanente con los referentes teóricos sobre pensamiento crítico, Thinking Classroom, las 7E y la enseñanza de la química.

					Transferibilidad: Se favoreció mediante la descripción detallada del contexto, los participantes, la secuencia didáctica, las estrategias implementadas, los instrumentos utilizados y el procedimiento de análisis, permitiendo que la propuesta metodológica pueda ser considerada en investigaciones desarrolladas en contextos educativos similares.
	Objetivo específico 1: Identificar mediante la implementación de un test de Halpern adaptado, las habilidades de pensamiento crítico, interpretación y análisis de problemas en un grupo de profesores de química en formación.	Fase de inicio	Aplicación de la prueba diagnóstica Test de Halpern adaptado. (Anexo 1)	Clasificación del nivel de complejidad inicial mediante la rúbrica fundamentada en la Taxonomía SOLO y representación de los resultados mediante la pirámide de alcance.	Evidencias del nivel inicial de desarrollo de las habilidades de interpretación y análisis.
	Objetivo específico 2: Determinar el diseño y programación del software TítiraCurve,				

	desarrollado en Arduino IDE y Python, integrado a un sistema medidor de pH basado en Arduino UNO, para la construcción de curvas de titulación de los equilibrios ácido-base, como material educativo que contribuya en el fortalecimiento de las habilidades de pensamiento crítico, interpretación y análisis de problemas en un grupo de profesores de química en formación.	Fase de desarrollo	Diseño y construcción del software TitrCurve. Diseño de la secuencia didáctica. (Anexo 2,3,4)		
	Objetivo específico 3: Caracterizar las habilidades de pensamiento crítico interpretación y análisis de problemas a través de la implementación de una secuencia de actividades fundamentada en la metodología del modelo integrado Thinking Classroom y las estrategias de las 7E.	Fase de finalización	Aplicación de la secuencia didáctica. (Anexo 2,3,4) Aplicación del Test de Halpern adaptado (prueba de salida). (Anexo 1)	Análisis de las producciones académicas mediante la rúbrica fundamentada en la Taxonomía SOLO e integración de los resultados mediante la pirámide de alcance. Comparación entre la prueba de entrada y la prueba de salida mediante la rúbrica fundamentada en la Taxonomía SOLO y la pirámide de alcance.	Evidencias del progreso alcanzado en las habilidades de interpretación y análisis durante la implementación de la secuencia didáctica. Caracterización del nivel de complejidad alcanzado por los profesores de química en formación en las habilidades de interpretación y análisis.

Nota. Autores (2026)

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados de la investigación y su análisis, organizados de acuerdo con las fases metodológicas establecidas. En primer lugar, se exponen los resultados obtenidos en la fase diagnóstica, mediante la aplicación del Test de Halpern adaptado. Posteriormente, se presenta el proceso de diseño y construcción experimental del Software TitraCurve como interfaz del sistema medidor de pH, así como los resultados derivados de las actividades teórico-prácticas desarrolladas en el marco del taller titulado *“Construcción de curvas de titulación potenciométricas ácido-base mediante una interfaz analógica-digital con Arduino UNO y la integración del Software interactivo TitraCurve”*. Finalmente, se analizó los resultados obtenidos durante la implementación de la secuencia didáctica fundamentada en el modelo integrado Thinking Classroom y las 7E, con el propósito de fortalecer las habilidades de pensamiento crítico en los PQF.

En correspondencia con el criterio metodológico descrito en el capítulo anterior, los resultados se organizan a partir de la sub-habilidad seleccionada como referente analítico para cada una de las habilidades evaluadas. Esta decisión responde a que las sub-habilidades actúan de manera integrada durante los procesos de razonamiento y resolución de problemas, por lo que el análisis se centra en aquella que presentó mayor evidencia en las producciones de los PQF y que permitió explicar con mayor claridad el desarrollo de la habilidad en su conjunto. A partir de este criterio, los resultados se interpretan considerando los niveles de complejidad establecidos por la taxonomía SOLO, con el propósito de caracterizar el desarrollo de las habilidades de pensamiento crítico durante la implementación de la secuencia didáctica.

8.1. Fase de inicio: Aplicación Test de Halpern

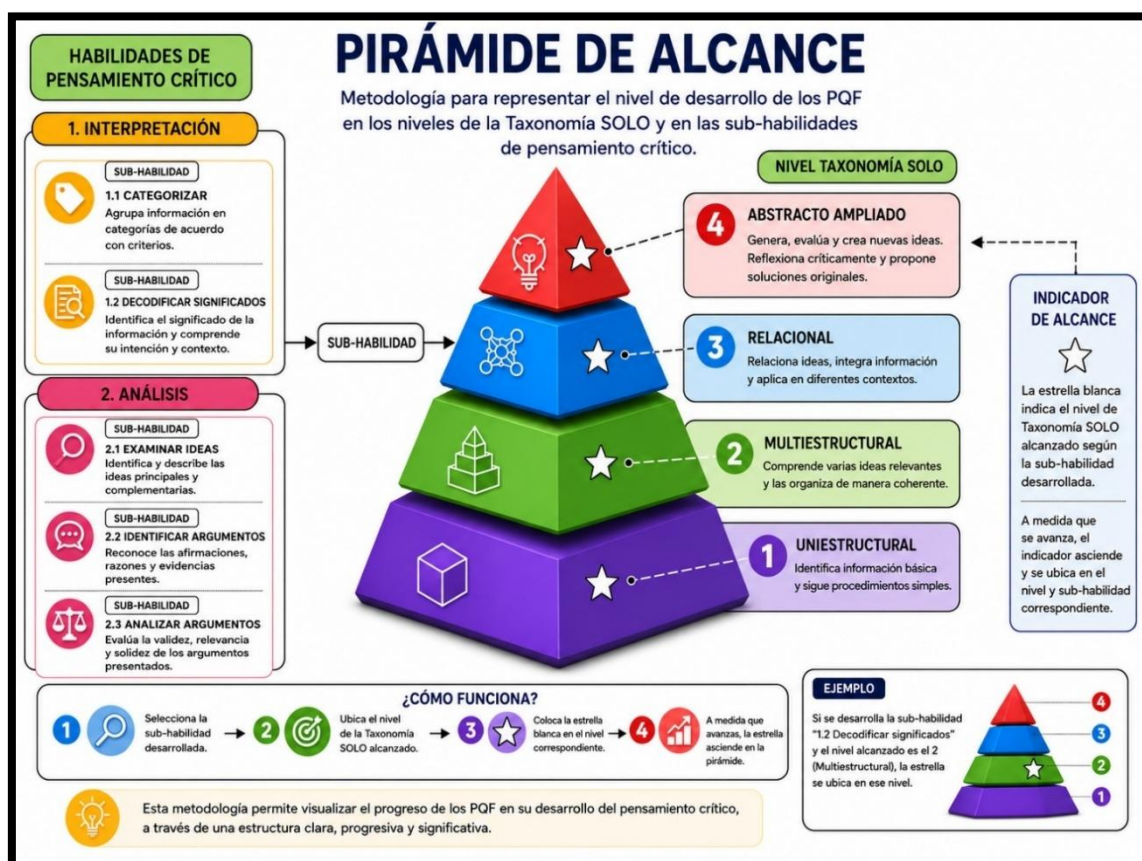
En la fase de inicio, se aplicó una actividad diagnóstica aplicando una adaptación del Test de Halpern (**Anexo 1**), para analizar las habilidades de interpretación y análisis de problemas de los PQF. Los resultados permitieron establecer una línea base del estado de las habilidades de pensamiento crítico, sin la influencia de la intervención didáctica. Adicionalmente, se diseñó la metodología denominada pirámide de alcance, la cual, como se observa en la **Figura 23**, permitió representar el nivel de desarrollo de los PQF en los niveles de la Taxonomía SOLO y en las sub-habilidades de pensamiento crítico.

La Pirámide de Alcance, propuesta metodológica de nuestra autoría, se diseñó como una representación visual para valorar y comunicar el nivel de desarrollo alcanzado por los profesores en formación (PQF) en determinadas habilidades de pensamiento crítico, a partir de la relación entre sus sub-habilidades y los niveles de la Taxonomía SOLO. Esta propuesta surge como una estrategia propia para integrar ambos referentes teóricos y facilitar la interpretación de los resultados obtenidos durante la investigación. La metodología se organiza en cuatro niveles ascendentes de la Taxonomía SOLO: uniestructural, multiestructural, relacional y abstracto ampliado, los cuales representan un avance progresivo en la complejidad del aprendizaje. En el costado izquierdo de la pirámide se ubican las habilidades de interpretación y análisis, junto con las sub-

habilidades seleccionadas para la investigación: categorizar información, decodificar significados, examinar ideas, identificar argumentos y analizar argumentos. Cada sub-habilidad es relacionada con el nivel de desarrollo evidenciado por los PQF.

Para establecer el alcance de cada sub-habilidad, se utiliza una estrella blanca como indicador visual. Esta se ubica en el nivel de la pirámide correspondiente al desempeño alcanzado por el participante o grupo analizado. De esta manera, el desplazamiento de la estrella hacia niveles superiores permite visualizar el progreso desde la identificación de información o el reconocimiento de elementos aislados, hasta la integración, evaluación y generación de nuevas relaciones o propuestas. Así, la pirámide permite representar de manera sintética tanto el nivel alcanzado como el progreso en el desarrollo de las habilidades de pensamiento crítico. En este sentido, la Pirámide de Alcance constituye una herramienta metodológica de elaboración propia, desarrollada específicamente para esta investigación, que articula los referentes de pensamiento crítico y la Taxonomía SOLO con los resultados obtenidos, permitiendo visualizar de forma clara y progresiva el desarrollo de las sub-habilidades evaluadas.

Figura 23. Metodología pirámide de alcance.



Nota. Autores (2026)

Esta actividad está dividida en dos secciones:

8.1.1. Sección A: Habilidad de interpretación

En la aplicación del test de Halpern, para la habilidad de interpretación, específicamente la sub-habilidad categorización de la información, los resultados evidenciaron que, de los 15 PQF, 13 fueron clasificados en el nivel uniestructural de la Taxonomía SOLO, mientras 2 alcanzaron el nivel multiestructural. Estos resultados corresponden al diagnóstico inicial y permiten identificar que el nivel de complejidad del grupo se concentró principalmente en el nivel uniestructural, caracterizado por respuestas centradas en un único aspecto relevante de la situación planteada, sin establecer relaciones con otros conceptos o elementos involucrados en la actividad, lo que es consistente con las características descritas para este nivel por Biggs (2005). En consecuencia, el análisis que se presenta a continuación se centra en las respuestas representativas de los PQF clasificados en este nivel, dado que constituyen la tendencia predominante del grupo y permiten caracterizar la manifestación inicial de la sub-habilidad categorización de información, entendida como la capacidad para identificar, organizar y clasificar la información relevante de acuerdo con criterios conceptuales y contextuales (Facione, 2011). Aunque las respuestas ubicadas en el nivel multiestructural fueron consideradas durante el proceso de análisis, estas no constituyen el eje central de la interpretación, ya que representan una proporción menor de los PQF.

Situación 1: Lecturas inestables del sistema de pH

Ante la variación de lecturas entre 4,80 y 4,50 en un sistema de medición de pH, las respuestas de los PQF evidenciaron una tendencia a atribuir el fenómeno a causas aisladas. Por ejemplo, el PQF 2 señaló:

“Puede ser que el potenciómetro esté mal calibrado o dañado o que el analista esté haciendo una inadecuada práctica de medición”

Aunque se reconocen posibles fuentes de error, la explicación reduce el fenómeno a factores independientes, sin considerar la interacción entre variables instrumentales, químicas y procedimentales. Esto evidencia una categorización no jerarquizada de la información. De manera similar, el PQF 5 asoció directamente el problema a un único componente:

“Puede ser que electrodo este dañado o que el analista no sepa realizar una correcta medición”

Esta respuesta reflejó una relación causa-efecto, sin mediación analítica, consistente con el nivel uniestructural descrito por Biggs (2005). En la selección de acciones correctivas, el PQF 10 propuso el cambio del electrodo como solución inmediata, justificando que esto permitiría identificar si la variación proviene del instrumento o de la disolución. Aunque la respuesta introduce una estrategia de verificación, el razonamiento continúa centrado en un único elemento del sistema, sin integrar el comportamiento global de la medición. Este tipo de atribución casual

simplificada ha sido descrito por Afikah et al. (2024) como característico de niveles iniciales de pensamiento crítico.

En la situación 1, en las preguntas de selección la mayoría de los PQF seleccionó la opción b (revisar conexión) o c (cambiar electrodo). Ello sugiere que el participante lleva a cabo una Categorización ya que logra asociar la causa a un componente físico, pero no logra comprender que una variación de 0.3 unidades de pH requiere primero una validación sistémica (limpieza/calibración) antes del reemplazo, por tanto, falla en la Decodificación de significados.

Desde la perspectiva del pensamiento crítico, las respuestas evidencian una tendencia a interpretar el fenómeno a partir de causas aisladas. En este sentido, predominó la sub-habilidad de categorización de información, ya que los PQF identificaron variables instrumentales, químicas y procedimentales relevantes, pero sin establecer relaciones entre ellas dentro del sistema de medición (Facione, 2011). Este comportamiento corresponde al nivel uniestructural de la Taxonomía SOLO, caracterizado por la focalización en un único elemento del problema sin integración relacional (Biggs, 2005).

En términos disciplinares, la estabilidad de las mediciones potenciométricas depende de factores como la calibración del electrodo, el estado de la sonda y las condiciones experimentales del sistema. La ausencia de articulación entre estas variables evidencia una comprensión fragmentada del proceso de medición de pH y las interacciones presentes en los sistemas potenciométricos ácido-base (Skoog et al., 2023).

Situación 2: Calibración del sistema medidor de pH

En la situación de calibración, se observan discrepancias entre valores esperados y obtenidos (4,00 vs 4,01 y 7,00 vs 6,20). El PQF 8 interpretó estos resultados afirmando:

“La solución puede estar mal”

Esta respuesta evidencia identificación de un factor sin articulación con la discrepancia experimental, lo que reflejó una interpretación no sustentada en evidencia empírica. Según Facione (2011), la interpretación requiere atribuir significado a la información más allá de su reconocimiento.

En la selección de la explicación más adecuada, el PQF 12 postuló: *“atribuye el error a la falta de limpieza de la sonda”*, argumentando que las soluciones están correctamente preparadas. Aunque identificó un elemento técnico pertinente, no establece relación explícita entre la condición del sensor y los resultados obtenidos, lo que limita la integración de variables dentro del sistema experimental. Este tipo de dificultad ha sido reportado por Hakim y Talib (2024) en contextos de análisis instrumental.

En relación con el pensamiento crítico, las respuestas mostraron procesos de interpretación centrados en la identificación de errores técnicos específicos. En este sentido, predominó la sub-habilidad de categorización de información, debido a que los PQF reconocieron elementos relevantes del problema, como la calibración del sistema y el funcionamiento del sensor, pero sin profundizar en las relaciones entre estos factores y

la confiabilidad de las mediciones obtenidas (Facione, 2011). Esto evidenció un nivel uniestructural de la Taxonomía SOLO, caracterizado por el reconocimiento de elementos aislados sin integrarlos en una explicación coherente del fenómeno (Biggs, 2005).

Desde el punto de vista disciplinar, la calibración de sensores de pH requiere comprender la relación entre las soluciones buffer, la calibración del sensor y la respuesta del electrodo. La falta de integración de estos aspectos limitó la comprensión del funcionamiento instrumental y del papel de la calibración en la obtención de resultados experimentales confiables (Skoog et al., 2023).

Situación 3: Volúmenes de equivalencia.

En el análisis potenciométrico de una bebida cola descarbonatada, se discute la selección del primer volumen de equivalencia para determinar la concentración inicial de ácido fosfórico. El PQF 14 seleccionó la opción correcta y justificó su respuesta en términos de la neutralización del primer protón y la relación estequiométrica entre NaOH y H_3PO_4

“Porque se neutraliza el primer protón H_3PO_4 y hay una relación estequiométrica entre los milimoles de NaOH y milimoles de H_3PO_4 para determinar su concentración”.

Aunque se reconoció un principio químico relevante, la explicación no desarrolla la relación entre la formación de especies intermedias y el comportamiento global de la curva de titulación, por lo que la interpretación permanece en un nivel conceptual descriptivo.

Desde la perspectiva del pensamiento crítico, los resultados evidenciaron una interpretación centrada en el reconocimiento de principios químicos puntuales, particularmente relacionados con la neutralización del primer protón y la relación estequiométrica del sistema. En este sentido, predominó la sub-habilidad de categorización de información, ya que los PQF identifican elementos conceptuales relevantes, pero sin establecer relaciones integradas entre especies químicas presentes y el comportamiento global de la curva de titulación. Lo anterior corresponde al nivel uniestructural de la Taxonomía SOLO (Biggs, 2005; Facione, 2011).

Con respecto al punto de vista disciplinar, la interpretación de los volúmenes de equivalencia en sistemas ácido-base polipróticos requiere relacionar las etapas sucesivas de neutralización con la formación de especies intermedias y los cambios observados en la curva potenciométrica. La ausencia de esta articulación evidencia dificultades en la comprensión integral del comportamiento químico del ácido fosfórico durante la valoración potenciométrica (Skoog et al., 2023).

Los resultados evidenciaron que los PQF lograron identificar elementos relevantes de los problemas, pero presentaron dificultades para integrarlos en explicaciones coherentes, lo que limitó la construcción de significado. Este comportamiento se alineó con el nivel uniestructural de la Taxonomía SOLO (Biggs, 2005), caracterizado por el análisis de elementos aislados sin establecimiento de relaciones. Finalmente, la pirámide

de alcance (**Figura 24**) permitió representar el nivel de desarrollo alcanzado por los PQF, en correspondencia con los niveles de la Taxonomía SOLO y la sub-habilidad de categorización de información.

Figura 24. Pirámide de alcance habilidad de interpretación, Test de Halpern.



Nota. Autores (2026)

En relación con lo anterior, se puede observar en la **Figura 24** que se observa una predominancia de la sub-habilidad de categorización de información, evidenciando un nivel de complejidad ubicado en el nivel uniestructural de la Taxonomía SOLO, ya que los PQF lograron identificar un único aspecto relevante de la situación sin establecer relaciones más amplias entre los elementos analizados. Asimismo, no se evidencia un avance hacia procesos interpretativos más complejos (Facione, 2011). Estos hallazgos coinciden con estudios previos que reportan dificultades similares en la interpretación de fenómenos científicos en contextos educativos (Afikah et al., 2024; Hakim y Talib, 2024).

En el ámbito de la química analítica, esta limitación resulta relevante, dado que procesos como la medición de pH, la calibración instrumental y la interpretación de curvas de valoración requieren la integración de múltiples variables experimentales (Skoog, 2023). En este sentido, los resultados evidencian la necesidad de fortalecer niveles superiores de interpretación.

8.1.2. Sección B: Habilidad de análisis de problemas

Para la evaluación de la habilidad de análisis mediante la aplicación del test de Halpern, los resultados evidenciaron que de los 15 PQF, 11 fueron clasificados en el nivel

multiestructural de la Taxonomía SOLO, mientras que 4 se ubicaron en el nivel uniestructural. Estos resultados corresponden al diagnóstico inicial y muestran que el nivel de complejidad del grupo se concentró principalmente en multiestructural, caracterizado por la identificación de diversos elementos relevantes de las situaciones planteadas, aunque sin lograr establecer relaciones entre ellos para construir una comprensión integrada del fenómeno, tal como la plantea Biggs (2005). En consecuencia, el análisis que se presenta a continuación se centró en las respuestas representativas de los PQF clasificados en este nivel, dado que constituyen la tendencia predominante del grupo y permiten caracterizar la manifestación inicial de la habilidad de análisis, entendida como la capacidad para identificar las relaciones entre ideas, reconocer la estructura de los argumentos y examinar la función que cumplen sus diferentes componentes dentro de un razonamiento (Facione, 2011). Aunque las respuestas correspondientes al nivel uniestructural fueron consideradas durante el proceso de categorización, estas no constituyen el eje central de la interpretación, ya que representaron una proporción menor de participantes y evidencian un nivel de complejidad distinto al predominante.

Situación 1: Razonamiento del estudiante.

Ante la afirmación de un estudiante que consideró innecesaria la calibración del sensor de pH conectado al Arduino, las respuestas de los PQF evidenciaron una tendencia a examinar múltiples elementos del problema, particularmente relacionados con el funcionamiento del equipo, el uso de soluciones buffer y la confiabilidad de la medición. El PQF 4 señaló:

“El sensor debe calibrarse con soluciones buffer para asegurar que las mediciones sean correctas, ya que esto permite ajustar el equipo antes de usarlo”.

En esta respuesta se identificaron diversos elementos conceptuales, tales como la calibración, el uso de soluciones patrón y la necesidad de garantizar mediciones confiables. Esto evidenció que el PQF 4 posee conocimientos sobre el procedimiento y su finalidad; sin embargo, estos elementos se presentan de manera aditiva, sin establecer relaciones explícitas entre la calibración, la respuesta electroquímica del electrodo y la validez de los datos obtenidos.

De manera similar, el PQF 6 planteó:

“La calibración es importante porque permite que el equipo funcione adecuadamente y de resultados más precisos”.

Aunque la respuesta reconoce múltiples aspectos del proceso, como el funcionamiento del equipo y la precisión de la medición, no se profundiza en cómo estos elementos se articulan dentro del sistema de medición potenciométrica. En este sentido, el PQF 6 examinó ideas relevantes, pero no estableció relaciones entre el ajuste del sistema, la señal electroquímica y la confiabilidad de los resultados.

En términos del pensamiento crítico, esto evidenció el desarrollo de la sub-habilidad de identificar argumentos, aunque sin alcanzar una integración conceptual, ya que se reconocen distintos componentes del problema sin analizar la manera en que estos relacionan entre sí (Facione, 2011). Este comportamiento es característico del nivel multiestructural de la Taxonomía SOLO, donde el conocimiento se organiza como una acumulación de elementos relevantes, pero sin articulación relacional entre ellos. (Biggs, 2005).

Desde el punto de vista disciplinar, esta limitación resulta significativa, ya que la calibración no solo es un procedimiento técnico, sino un proceso que permite relacionar la respuesta del electrodo con valores conocidos de pH, garantizando la validez de la medición (Skoog et al., 2023). La ausencia de esta articulación en las respuestas evidenció una comprensión fragmentada del fenómeno.

Situación 2: Decodificación del montaje

En la situación relacionada con la recomendación de utilizar una placa de alta impedancia, los PQF lograron identificar diversos elementos asociados al sistema de medición, particularmente en términos de estabilidad, precisión y transmisión de la señal. El PQF 8 afirmó:

“La alta impedancia permite que la medición sea más estable y evita errores en los datos”.

En esta respuesta se reconocen múltiples aspectos relevantes, como la estabilidad de la señal y la precisión de la medición, lo que evidenció que el PQF 8 posee conocimientos sobre el comportamiento general del sistema. No obstante, estos elementos se presentaron de manera descriptiva, sin establecer relaciones explícitas entre la naturaleza de la señal electroquímica generada por el electrodo y su procesamiento en el circuito.

De manera similar, el PQF 10 manifestó:

“Si no se usa alta impedancia, la señal puede alterarse y dar resultados incorrectos”.

Aunque se identificaron relaciones generales entre el uso del sistema y la calidad de los datos, la explicación no profundiza en el mecanismo que vincula la resistencia interna del electrodo con la necesidad de alta impedancia en el sistema de medición. En este sentido, los PQF examinaron ideas relevantes, pero no lograron articularlas en una explicación integrada del fenómeno.

Se seleccionaron las respuestas de los PQF 8 y 10, por ser representativas de la tendencia predominante del grupo. De los 15 PQF participantes, el 73% se ubicó en el nivel multiestructural y el 27% restantes en el nivel uniestructural. Por otra parte, el 100% de los estudiantes (15 de 15) optó por la opción B, que vinculó la falta de impedancia con la inestabilidad y falta de exactitud en las lecturas.

Desde la perspectiva del pensamiento crítico, esto evidenció la sub-habilidad de identificar argumentos, en la que se reconocieron múltiples elementos del sistema sin establecer relaciones inferenciales entre ellos (Facione, 2011), lo que corresponde al nivel multiestructural descrito por Biggs (2005).

Situación 3: Determinación experimental.

En la situación relacionada con el análisis de criterios para la selección de indicadores ácido-base, los PQF identificaron múltiples variables relevantes, tales como los intervalos de pH, los cambios de color y las etapas de la titulación. El PQF 11 mencionó:

“El naranja de metilo se usa en pH ácido y la fenolftaleína en pH básico, por eso sirven para diferentes momentos de la titulación”.

Esta respuesta evidenció el reconocimiento de diversos elementos asociados al problema, como el comportamiento de los indicadores y los rangos de pH en los que estos actúan. Sin embargo, estos elementos se presentaron de manera aditiva, sin establecer relaciones explícitas entre el intervalo de viraje del indicador y el pH correspondiente a los puntos de equivalencia del sistema.

De manera similar, el PQF 13 afirmó:

“Cada indicador se selecciona según el rango de pH donde ocurre el cambio”

Aunque la respuesta identificó criterios relevantes para la selección de indicadores, no se articuló estos con la naturaleza del sistema químico, particularmente con el carácter triprótico del ácido fosfórico y las etapas sucesivas de neutralización. En este sentido, los PQF examinaron múltiples ideas, pero no lograron integrarlas en una explicación que relacione variables experimentales y conceptuales.

En relación con el pensamiento crítico, las respuestas evidenciaron la sub-habilidad de identificar argumentos sin integración relacional, en la que se reconocieron distintos elementos del problema sin establecer conexiones entre ellos (Facione, 2011). Este comportamiento es característico del nivel multiestructural, donde el conocimiento se organiza como una acumulación de elementos no articulados (Biggs, 2005).

Desde la perspectiva disciplinar, la selección de indicadores en valoraciones ácido-base requiere considerar la correspondencia entre el intervalo de transición del indicador y el pH del punto de equivalencia en cada etapa de titulación (Skoog et al., 2023). La ausencia de esta articulación evidencia una comprensión fragmentada del proceso.

Por último, la pirámide de alcance (**Figura 25**) permitió evidenciar el nivel de desarrollo alcanzado por los PQF, en relación con los niveles de la Taxonomía SOLO y la sub-habilidad de identificar argumentos.

Figura 25. Pirámide de alcance habilidad de análisis, Test de Halpern.



Nota. Autores (2026)

En la **Figura 25** se puede visualizar el estado inicial de la habilidad de análisis de problemas. En ella se puede observar que la mayoría (73 %) de los PQF se ubican en el nivel multiestructural, indicativo de que, aunque los PQF identificaron elementos relacionados con el comportamiento químico del sistema, el funcionamiento instrumental y las condiciones procedimentales de la valoración potenciométrica; no obstante, el análisis permanece descriptivo y segmentado, sin establecer relaciones explicativas entre las variables implicadas. (Facione, 2011). De igual manera, los resultados evidenciaron limitaciones para construir explicaciones articuladas sobre el sistema ácido-base durante el proceso de titulación, aspecto reportado también en investigaciones previas sobre el pensamiento crítico y comprensión de fenómenos científicos en contextos de formación docente (Afikah et al., 2024; Hakim y Talib, 2024).

A partir del análisis de las habilidades de interpretación y análisis de problemas en la actividad diagnóstica, se evidenciaron una relación progresiva entre ambas, en la que la interpretación actuó como base para el desarrollo del análisis, aunque sin consolidarse plenamente una transición hacia niveles superiores del pensamiento crítico, lo cual hizo referencia al paso desde la fase cuantitativa de la Taxonomía SOLO correspondiente a los niveles uniestructural y multiestructural hacia la fase cualitativa nivel relacional y abstracto ampliado lo que permitió a los PFQ pasar de un procesamiento descriptivo y fragmentado a una integración de las variables experimentales alcanzadas.

En la habilidad de interpretación, los resultados mostraron un predominio del nivel uniestructural, caracterizado por la identificación de un único elemento relevante dentro

de la situación problema, lo que limitó la construcción de significado de manera integrada (Biggs, 2005). En este nivel, los PQF lograron reconocer información puntual como posibles causas de error en la medición de pH, condiciones del sensor o características de los sistemas de titulación, pero sin establecer relaciones entre los diferentes componentes del fenómeno. En coherencia con estos resultados, la sub-habilidad de categorización de información, entendida como la capacidad para identificar y organizar información de acuerdo con su significado y contexto (Facione, 2011), evidenció un procesamiento centrado principalmente en elementos aislados, sin lograr integrarlos de manera articulada para construir una interpretación más compleja de la situación planteada.

Por su parte, en la habilidad de análisis se evidenció un predominio en el nivel multiestructural, lo que representó un avance respecto a la interpretación, en tanto los PQF lograron identificar múltiples elementos dentro de las situaciones problemas. Relacionadas con el funcionamiento del sensor de pH, la importancia de la calibración, la influencia de la impedancia en la medición y el comportamiento de los indicadores ácido-base. No obstante, estas ideas se presentaron de manera fragmentada, sin lograr una integración relacional que permitiera construir explicaciones coherentes y fundamentadas (Biggs, 2005). En relación con lo anterior el análisis de problemas se evidenció en la sub-habilidad de identificar argumentos, relacionada con la identificación de conceptos principales presentes en el problema de estudio (Facione, 2011).

Por lo tanto, se afirma que las habilidades de interpretación y análisis de problemas se encuentran en un nivel inicial intermedio de desarrollo, donde la primera permitió reconocer elementos del problema y la segunda avanzar hacia su exploración, pero sin consolidar aún procesos de articulación conceptual profunda. Esta situación limitó la construcción de explicaciones científicas fundamentales y la toma de decisiones en contextos experimentales.

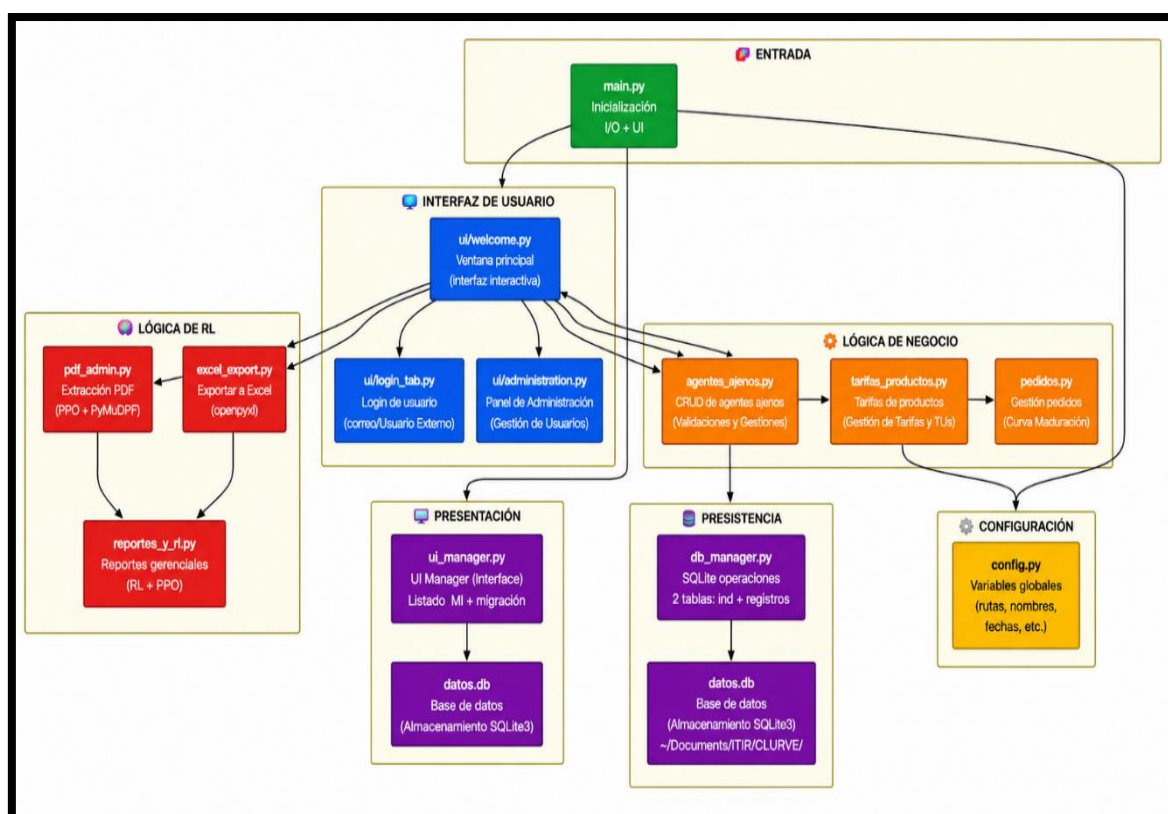
En coherencia con Facione (2011), el desarrollo del pensamiento crítico requiere la integración progresiva de sus sub-habilidades, de manera que la interpretación no solo permita reconocer información, sino que sirva como base para un análisis estructurado y, posteriormente, para la evaluación y la inferencia. En el presente estudio, esta progresión se evidenció de manera parcial, lo que justificó la necesidad de implementar estrategias didácticas orientadas a fortalecer la articulación entre estas habilidades.

En el contexto de la enseñanza de la química, esta necesidad es particularmente relevante, dado que la comprensión de procesos como la medición potenciométrica, la calibración de instrumentos y la interpretación de curvas de titulación exige la integración y aplicación de conocimientos conceptuales y procedimentales, así como el establecimiento de relaciones entre ellos. En este sentido, la implementación del modelo integrado Thinking Classroom y las estrategias de las 7E se planteó como una propuesta didáctica orientada a favorecer el tránsito de los PQF desde los niveles de complejidad uniestructurales y multiestructurales hacia un nivel relacional, de acuerdo con la taxonomía SOLO, promoviendo así el fortalecimiento de las habilidades de interpretación y análisis de problemas.

8.2. Fase de desarrollo: Diseño y construcción experimental del Software TitraCurve como interfaz del sistema medidor de pH

Los resultados obtenidos en la fase de desarrollo permitieron determinar el proceso de diseño, programación y construcción del Software TitraCurve en Arduino IDE y Python, el cual fue articulado al sistema medidor de pH soportado en Arduino UNO mediante la integración progresiva de componentes conceptuales, electrónicos, computacionales y experimentales orientados a la construcción de curvas potenciométricas ácido-base. Este proceso no se limitó al desarrollo de un sistema de adquisición de datos experimentales, sino que involucró la construcción de una estrategia didáctica dirigida a favorecer habilidades asociadas al pensamiento crítico, específicamente procesos cognitivos relacionados con la habilidad de interpretación y análisis de problemas en un grupo de PQF. Sumado a esto la integración de los diferentes módulos promovió la construcción de un sistema funcional capaz de registrar señales potenciométricas, procesar datos experimentales, representar gráficamente el comportamiento químico de los sistemas analizados y generar reportes de interpretación fundamentado en las titulaciones ácido-base. En la **Figura 26** se muestra el esquema general de la arquitectura y componentes del Software TitraCurve.

Figura 26. Esquema general de la arquitectura y componentes del sistema TitraCurve.



Nota. Autores (2026)

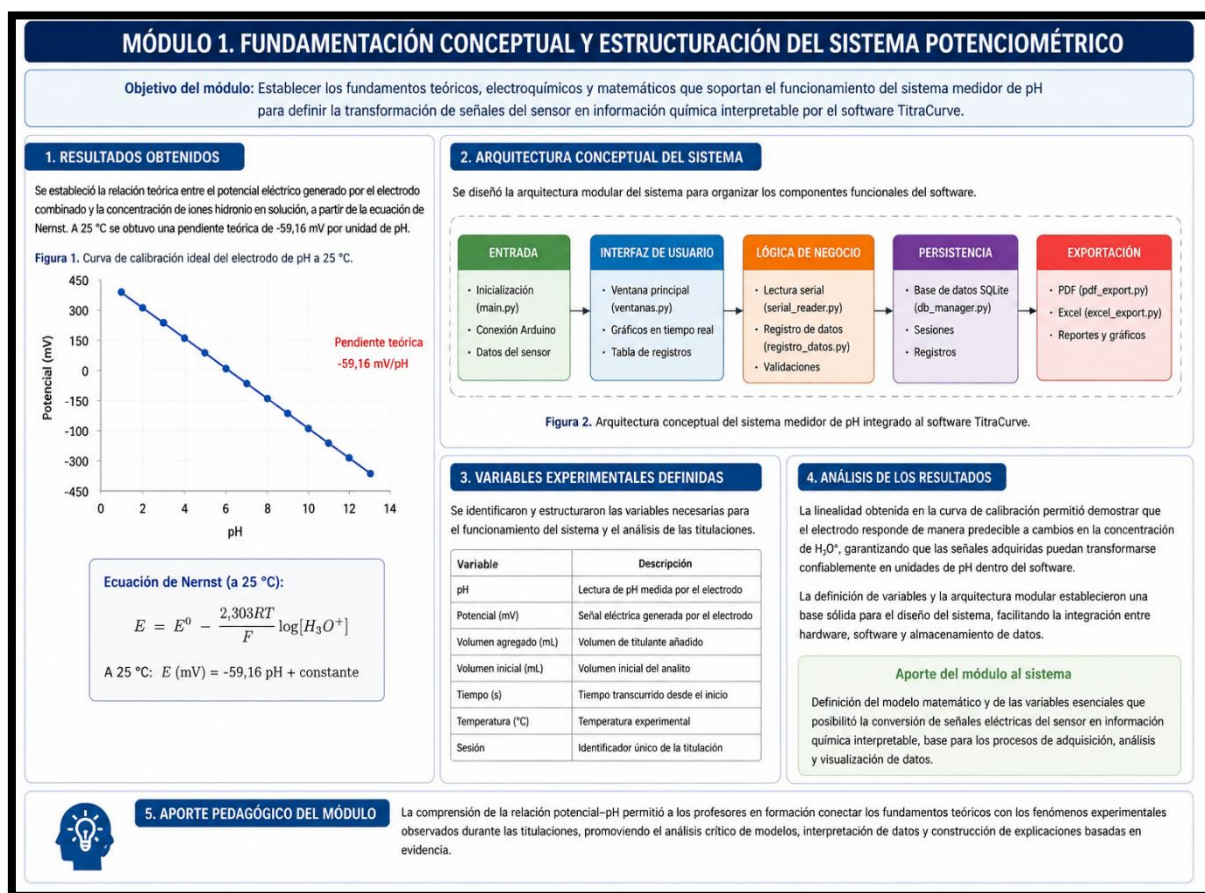
8.1. Modulo 1. Fundamentación conceptual

A partir de los resultados alcanzados durante la estructuración conceptual se logró definir los principios químicos, matemáticos y funcionales que soportaron el desarrollo del sistema medidor de pH integrado al Software TitraCurve. Durante la ejecución de este módulo se estableció la relación entre el comportamiento electroquímico del electrodo combinado y la respuesta digital requerida para el comportamiento computacional posterior. La ecuación de Nernst constituyó el fundamento teórico que permitió asociar variaciones del potencial eléctrico con cambios de concentración de iones hidronio (H_3O^+) presentes en las soluciones analizadas experimentalmente. Esta relación hizo posible establecer una función de transformación necesaria para convertir señales provenientes del sensor en datos químicamente interpretables dentro del entorno computacional desarrollado.

Como se observa en la **Figura 26**, correspondiente a la arquitectura general del sistema, el diseño conceptual facilitó la organización del funcionamiento del Software TitraCurve mediante una estructura jerárquica conformada por módulos de entrada, interfaz de usuario, lógica de manejo, persistencia de datos, configuración y exportación de resultados. Esta maquetación modular implementada logró establecer una separación funcional entre cada uno de los componentes involucrados durante el procesamiento de información experimental.

El análisis experimental de estos resultados favoreció la identificación estructural de carácter conceptual desarrollada, específicamente en que no constituyó solo una sola etapa preliminar de programación, sino una condición necesaria para garantizar coherencia entre el comportamiento químico y la respuesta computacional generada posteriormente por el software TitraCurve. La arquitectura modular redujo dependencias entre procesos internos y favoreció la escalabilidad del software, generando una oportunidad de incorporar procesos relacionados con adquisición experimental, procesamiento matemático y representación gráfica sin alterar el funcionamiento general del sistema medidor de pH, tal y como se evidencia en la **Figura 27**. Desde una perspectiva educativa, esta integración habilitó posteriormente que los PQF establecieran relaciones entre variables químicas observadas experimentales y representaciones digitales generadas automáticamente durante las titulaciones potenciométricas ácido-base in situ.

Figura 27. Esquema de análisis del módulo 1.

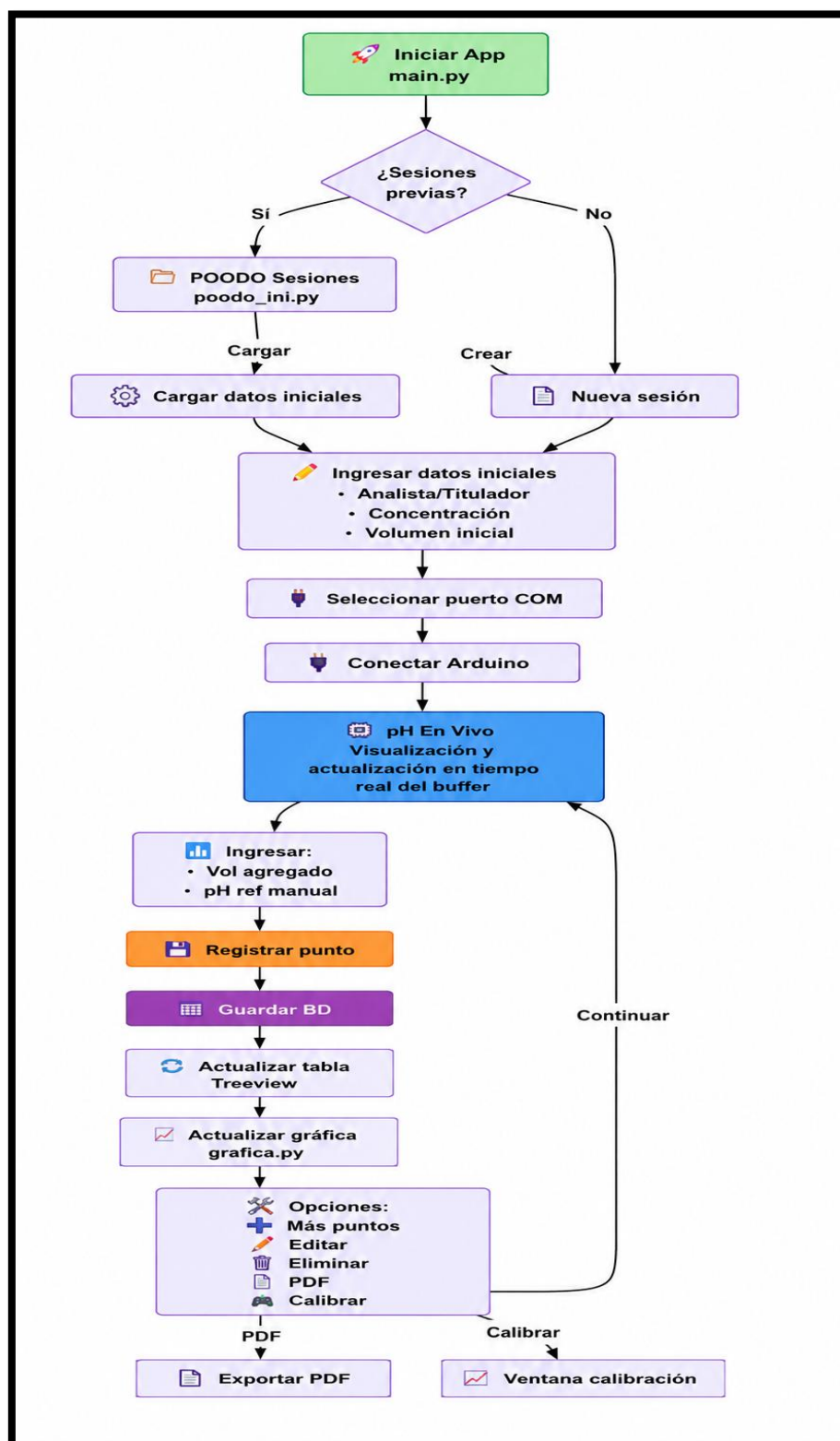


Nota. Autores (2026)

8.1.1. Modulo 2. Diseño y construcción del entorno físico-electrónico

Los resultados que se obtuvieron durante la construcción del entorno físico-eléctrico permitieron integrar el microcontrolador Arduino UNO R4 Mínima, el sensor de referencia DFRobot SEN0161-V2 y el electrodo cambiando de vidrio dentro un sistema único para la adquisición continua de señales de pH. La configuración desarrollada en este caso proporcionó una comunicación estable entre los componentes electrónicos y garantizó el procesamiento inicial de las señales analógicas proveniente del sistema medidor de pH integrado al Software Titracurve. Como se aprecia en la **Figura 28**, correspondiente al diagrama de flujo operacional del sistema medidor de pH, el proceso inició mediante la configuración de una nueva sesión experimental o de recuperación de sesiones previamente almacenadas de prácticas experimentales. Posteriormente se incorporó el registro de variables experimentales iniciales, selección automática de puerto COM y establecimiento de conexión con Arduino para ejecutar el proceso de lectura continua del pH.

Figura 28. Diagrama de flujo operacional del sistema medidor de pH.



Nota. Autores (2026)

Durante las pruebas experimentales realizadas se observó estabilidad en la adquisición de datos provenientes del sensor, permitiendo registrar variaciones sucesivas de pH durante los procesos de titulación potenciométrica ácido-base. La respuesta mostró

continuidad durante la obtención de datos y ausencia de interrupciones significativas durante el proceso experimental.

En concordancia con los anterior, el análisis de estos resultados indicó que la estabilidad obtenida en la comunicación entre los componentes físicos favoreció la obtención continua de la información experimental, aspecto significativo para la posterior construcción de curvas potenciométricas y la aplicación del criterio matemático de la primera y segunda derivada, con el cual, se determinaría el volumen y pH en el punto de equivalencia, junto con la determinación del analito de interés. Durante los ensayos desarrollados con sistemas monoproticos y politrópicos no se observaron interrupciones o anomalías significativas en la adquisición de la señal analógica-digital. Desde una perspectiva instrumental, este comportamiento indicó que el sistema medidor de pH integrado al Software TitrCurve diseñado, presentó suficiente robustez para ser implementado dentro de prácticas experimentales de laboratorio de química analítica. Asimismo, desde el contexto educativo, disponer de una respuesta instrumental estable favoreció que los PQF centraran su atención en la interpretación química de los fenómenos o conceptos observados en la utilidad de esta herramienta tecnológica.

Como se aprecia en la **Figura 29**, correspondiente al montaje físico del sistema medidor de pH, la configuración electrónica optimizó una adecuada comunicación entre cada uno de los componentes del sistema mediante conexiones VCC, GND y transmisión de la señal analógica-digital. Adicionalmente, la incorporación del circuito transmisor logró reducir las fluctuaciones asociadas a interferencias eléctricas externas que presentan ruidos de mediciones. En la **Tabla 19**, se muestra como el electrodo de vidrio se conectó a la placa PCB mediante interfaz BNC de tipo coaxial. Esta placa se conectó al Arduino UNO R4 Mínima, mediante cables Dupont, haciendo uso de las entradas analógicas.

Tabla 19. Conexiones reales del entorno físico.

Componente 1	Pin/ Conector	Componente 2	Pin/ Conector
Electrodo de pH	BNC	PCB sensor pH	BNC
PCB Sensor pH	VCC	Arduino	5V
PCB Sensor pH	GND	Arduino	GND
PCB Sensor pH	PO/AUT	Arduino	A0
Arduino	USB-C	Ordenador	Puerto USB

Nota. Autores (2026)

En esta arquitectura de conexión, el electrodo de pH se integró a la placa PCB mediante un conector BNC, garantizando estabilidad eléctrica y minimización de interferencias, lo cual fue esencial dado el carácter de alta impedancia y baja señal del sensor electroquímico. Posteriormente, la placa acondicionadora cumple la función de transformar la señal analógica de muy baja magnitud proveniente del electrodo en una señal de voltaje interpretable por el sistema digital. Esta señal fue transmitida al Arduino mediante conexiones simples de tres hilos (VCC, GND y salida analógica A0), lo que contribuyó delimitar una interfaz directa entre un fenómeno químico real como la actividad de iones hidronio en solución y su representación digital.

Finalmente, se pudo evidenciar que la comunicación entre el microcontrolador Arduino UNO R4 Mínima y el ordenador o computadora portátil (Laptop) mediante un cable tipo C proporcionó alimentación y transferencia de datos en tiempo real. Además, habilitó la visualización inmediata de los valores de pH a través de Software TitrCurve. Esta interacción tecnológica favoreció la construcción de aprendizajes significativos en química, al permitir que los PQF observaran la traducción de una propiedad fisicoquímica en una señal digital cuantificable.

Figura 29. Esquema de análisis del módulo 2.



Nota. Autores (2026)

8.1.2. Módulo 3. Entorno computacional y digital

Los resultados derivados de la implementación computacional evidenciaron que la comunicación serial establecida entre Arduino IDE y Python originó una adquisición continua y estable de datos experimentales durante las titulaciones potenciométricas ácido-base previamente ejecutadas. La velocidad de transmisión configurada en 115200 baudios (bps) consolidó la reducción de las pérdidas de información durante el intercambio de datos remitidos entre el sistema medidor de pH y el Software TitrCurve. Adicionalmente, la integración de librerías especializadas como *PySerial*, *NumPy*,

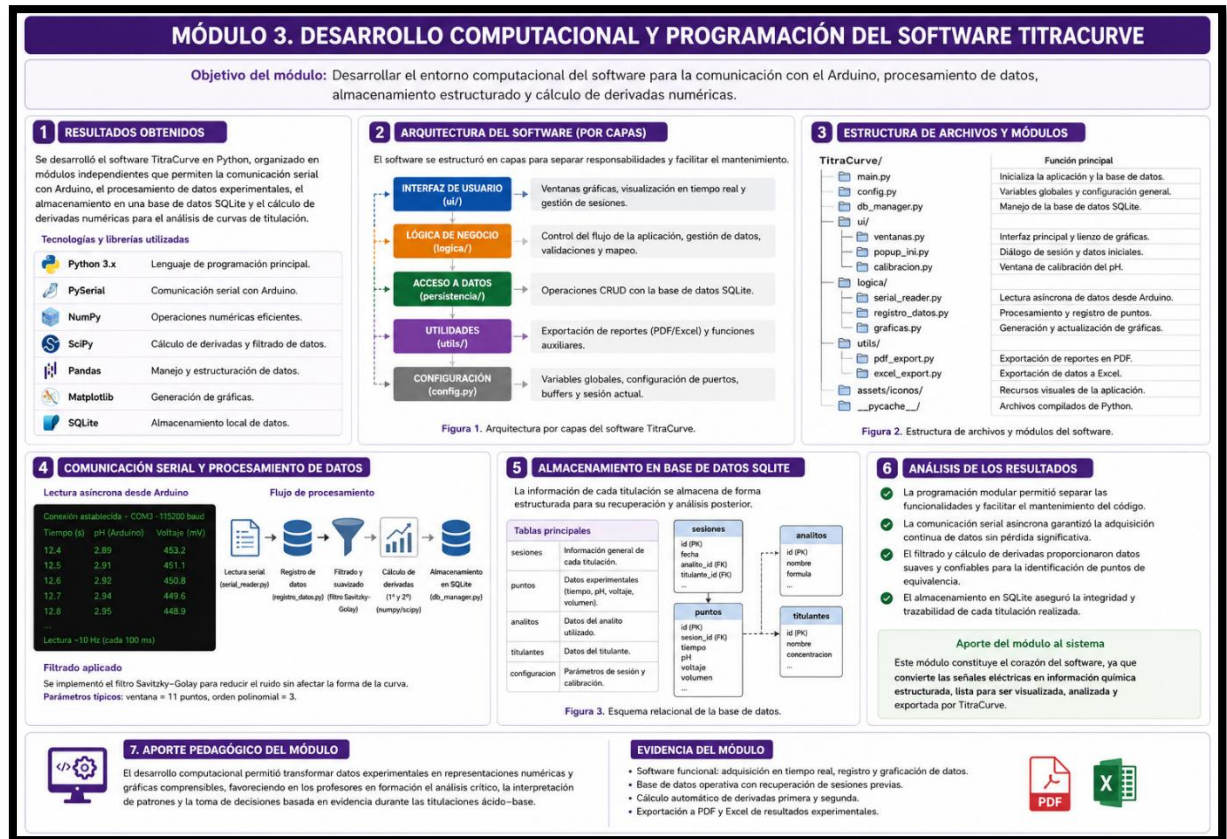
Pandas, *Matplotlib* y *SciPy* fortaleció el procesamiento matemático de las señales adquiridas y la construcción automática de las curvas de titulación en tiempo real in situ. Durante el funcionamiento del sistema se analizó que cada medición de pH fue almacenada y procesada de manera secuencial, permitiendo generar bases de datos organizadas para posteriores análisis químico-matemáticos.

El análisis de estos resultados indicó que la incorporación de algoritmos matemáticos destinados al filtrado y suavización de señales garantizó disminuir el ruido experimental generado por pequeñas fluctuaciones del electrodo durante las mediciones continuas en las determinaciones potenciométricas ácido-base abordadas en el laboratorio de química. Puntualmente la implementación del filtro *Savitzky-Golay* y del cálculo de gradientes mediante funciones derivativas contribuyó a mejorar la detección de regiones críticas asociadas a cambios abruptos de pH. Este comportamiento fue especialmente importante durante las titulaciones de sistemas polipróticos debido a la presencia de diferentes especies química protonadas y sus múltiples regiones de inflexión. En consecuencia, el procesamiento computacional desarrollado dio lugar a la transformación de datos experimentales dispersos en información cuantitativa estructurada, fortaleciendo la interpretación química del sistema estudiado. Asimismo, la estructuración automática de datos mediante bases de datos *SQLite* garantizó la trazabilidad experimental de cada ensayo realizado. Como resultado, la información obtenida dejó de constituir únicamente un registro instrumental y pasó a convertirse en una fuente organizada y dinámica para posteriores procesos de interpretación y análisis químico.

Como se observa en la **Figura 30**, correspondiente a la estructura de archivos y módulos del sistema de información, el Software TitrCurve fue organizado mediante archivos específicos asociados a la interfaz gráfica, procesamiento lógico de datos numéricos, lectura serial, almacenamiento de datos y exportación de resultados. Se resalto significativamente la integración de módulos como *Serial_reader.py*, encargado de la lectura asincrónica proveniente del microcontrolador; *registro_datos.py*, destinado a la generación dinámica de representación graficas mediante bibliotecas especializadas para Python. En conjunto, estas características consolidaron el Software TitrCurve como una herramienta tecnológica capaz de procesar y graficar información en tiempo real o in situ. Razón por la cual se integró de manera complementaria al sistema medidor de pH.

En la **Figura 31**, se evidencia el esquema completo de la conexión serial que se tuvo en cuenta para lograr la integración de los 3 módulos principales que relaciona el entorno eléctrico interno y externo con el fin de establecer el vínculo programable entre el microcontrolador, el entorno de desarrollo Arduino IDE y el lenguaje de programación Python para su posterior almacenamiento y procesamiento de datos experimentales obtenidos de la potencimetría ácido-base in situ.

Figura 30. Esquema de análisis del módulo 3.



Nota. Autores (2026)

Figura 31. Esquema completo de la comunicación serial.



Nota. Autores (2026)

8.1.2. Módulo 4. Entorno computacional y digital

En este módulo es importante resaltar que a modo de resultado la interfaz condujo a la construcción de un entorno interactivo orientado a la adquisición, visualización y procesamiento dinámico de la información que resultaba de las titulaciones potenciométricas ácido-base empleadas de manera experimental. Como se presenta en la **Figura 32**, correspondiente a la interfaz principal del Software TitrCurve, el entorno desarrollado integró simultáneamente variables relacionadas con el analito, valorante, concentración inicial, volumen experimental y comportamiento dinámico del pH durante las diferentes determinaciones potenciométricas. Durante el funcionamiento experimental, la interfaz incorporó mecanismos de actualización continua que registraron automáticamente valores de pH en tiempo real junto con la generación simultánea de tablas y representaciones gráficas asociadas al pH de la solución de estudio en función del volumen adicionado de valorante como se evidencia en la **Figura 33**. La construcción de una de las curvas de titulación estuvo acorde a lo que media el electrodo perteneciente al sistema medidor de pH, mientras que la otra curva, estuvo en relación a las medidas que tomaba el electrodo de referencia, el cual hacía parte del potenciómetro Beckman modelo pH sigma-40 (1) Meter con número de serie 0156693 y con número de inventario interno 0,24808, calibrado con sus adecuadas soluciones buffer de pH 4, 7 y 10 previamente fabricadas. Perteneciente al Departamento de Química de la Universidad pedagógica Nacional. Adicionalmente el sistema integró funciones relacionadas con calibración instrumental del sensor del electrodo, edición, eliminación y recuperación de registros, gestión de sesiones experimentales y exportación estructurada del reporte de resultados en formatos PDF y Excel. Adicionalmente también se asignó la opción de una función denominada "Oscuro o claro" para establecerle el color a toda la interfaz del software TitrCurve, según el gusto del usuario o del PQF.

Figura 32. Interfaz principal del Software TitrCurve versión 2,50.

The screenshot displays the main interface of the TitrCurve software. The window title is "TITRACURVE". On the left, the university's name "UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL" is shown, along with the faculty "FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA", department "DEPARTAMENTO DE QUÍMICA", and master's program "MAESTRÍA EN DOCENCIA DE LA QUÍMICA". Below this, the "TRABAJO DE GRADO:" section describes the project: "Caracterización de habilidades de pensamiento crítico mediante el modelo integrado Thinking Classroom y las 7E: Una conceptualización de la potenciometría ácido-base en el software TitrCurve". The "DOCENTES INVESTIGADORES:" section lists Daniel Steven Buenhombre Nuñez and Nerinder Xiomara López García. The "DIRECTOR:" section lists Diego Alexander Blanco Martínez. At the bottom left, it says "2026©". On the right, the "Ingrese datos iniciales de titulación" section contains four input fields: "Solución valorada (analito):", "Solución valorante (titulante):", "Concentración estimada valorante (mol/L):", and "Volumen inicial del analito (mL):". A "Registrar Datos" button is below these fields. Further down, the "Conexion con Arduino" section has a "Seleccione el puerto COM:" label, a dropdown menu showing "COM3", and an "Iniciar Titulacion" button. A toggle switch labeled "Oscuro" is in the top right corner.

Nota. Autores (2026)

Figura 33. Interfaz de la zona de trabajo del Software Titracurve versión 2,50.



Nota. Autores (2026)

En relación a lo anteriormente expuesto, los resultados obtenidos evidenciaron que la representación dinámica de información experimental transformó datos numéricos asilados en representaciones visuales de fácil interpretación química. Durante las prácticas experimentales desarrolladas, los PQF establecieron relaciones entre los diferentes puntos de inflexión del sistema ácido-base analizado, regiones amortiguadoras y comportamiento de especies químicas presentes en la solución estudiada.

El análisis de estos hallazgos y determinaciones finales de la interfaz principal de Software Titracurve, presentó correspondencia con lo señalado por Arellano et al. (2022), quienes establecieron que un prototipo educativo adquiere utilidad cuando facilita la visualización del fenómeno representado y proporciona herramientas cuantitativas que favorecen la comprensión conceptual. En la investigación Redecker (2020) planteó que los recursos digitales alcanzan mayor valor educativo cuando promueven procesos activos de interpretación, análisis y construcción de conocimiento sustentado en evidencias. Asimismo, UNESCO (2021) desataca que las tecnologías educativas adquieren significado pedagógico cuando facilitan procesos de interacción y comprensión de fenómenos científicos mediante representaciones dinámicas y contextualizadas. Sumado a esto desde el objetivo de investigación, la interfaz desarrollada fortaleció significativamente la enseñanza de la técnica electroquímica, puesto que la implementación de este Software evidenció una estrategia distinta de enseñar la construcción de curvas potenciométricas de los equilibrios ácido-base en un recurso tecnológico de análisis y discusión científica, promoviendo así procesos cognitivos donde

los PQF interpretaron evidencias experimentales y construyeron explicaciones relacionadas con el comportamiento químico de los sistemas polipróticos estudiados. En la **Figura 34** se presenta un esquema más ampliado de la interfaz trabajada en Titracurve.

Figura 34. Esquema de análisis del módulo 4.



Nota. Autores (2026)

8.1.3. Módulo 5. Validación funcional y rendimiento del sistema medidor de pH integrado al Software Titracurve

Este módulo orientado a la validación funcional del sistema medidor de pH integrado con el software Titracurve comprendió la evaluación experimental del comportamiento operativo y analítico bajo condiciones reales de titulación potenciométrica empleando sistemas ácido-base de diferente complejidad química. La validación experimental desarrollada por los docentes investigadores incorporó inicialmente un sistema monoprótico correspondiente a la valoración de ácido acético presente en vinagre comercial mediante una solución de NaOH de concentración analítica 0,09910 M. Posteriormente, se implementó un sistema poliprótico asociado a la valoración potenciométrica del ácido fosfórico presente en bebidas colas comerciales específicamente la Coca-Cola, de igual manera también se utilizó el mismo agente valorante con la misma concentración analítica. Como se observa en la **Figura 35**, el montaje experimental integró un soporte universal, bureta de 50,0 mL, vaso de precipitados, agitador magnético, potenciómetro con su respectivo electrodo combinado de referencia, el sistema medidor de pH basado en Arduino UNO, modulo transmisor o

placa PCB de referencia DFRobot-V2, computadora portátil (Laptop) y la integración del Software TitrCurve como interfaz de adquisición y procesamiento de información experimental.

Durante las titulaciones potenciométricas ejecutadas, el sistema registró continuamente variaciones de pH experimental y construyó simultáneamente las curvas de titulación ácido-base correspondientes, registrando el pH medido por los dos electrodos en el Software TitrCurve. Para el caso particular del ácido fosfórico contenido en bebidas colas se evidenciaron dos regiones de cambio significativo asociadas a los procesos sucesivos de neutralización de cada ion hidronio o protón (H_3O^+ o H^+) correspondientes a las especies químicas fosfatadas presentes en el sistema estudiado. Las curvas obtenidas mediante el Software TitrCurve presentaron un comportamiento sigmoideal con dos puntos de inflexión evidenciando coherencia con la respuesta teórica esperada para procesos titulométricos de ácido fosfórico (H_3PO_4) con hidróxido de sodio (NaOH).

De manera complementaria el sistema generó un reporte de resultados obtenidos al finalizar la respectiva determinación en formato PDF y Excel, los cuales fueron importantes porque a estos datos en una hoja de cálculo se le incorporaron procedimientos matemáticos basados en el criterio de la primera y segunda derivada para la identificación objetiva de los volúmenes y pH en los dos puntos de equivalencia. A partir de este procedimiento matemático se determinó que el primer volumen de equivalencia fue de 2,648 mL de NaOH con un pH aproximadamente de 4,58, mientras que el segundo fue de 7,1000 mL de NaOH para el segundo punto de equivalencia con un pH aproximado de 8,67.

La información experimental obtenida mediante el Software TitrCurve Permitió determinar posteriormente parámetros asociados a la composición química de las muestras evaluadas. Los resultados obtenidos en el análisis del reporte indicaron que para una muestra de Colca-Cola de 50,0 mL, existe una concentración molar aproximada de ácido fosfórico de $5,30 \times 10^{-3}$ mmol/mL, equivalente a 519 ppm, mientras que para el fosfato monobásico de sodio se obtuvo una concentración aproximada de $3,61 \times 10^{-3}$ mmol/mL, equivalente a 722 ppm. En este sentido, la muestra analizada se encuentra plenamente dentro de los límites legales permitidos en Colombia, es decir cumple con el criterio de las Buenas Prácticas de Manufactura estipulado en la Resolución 4126 de 1991 del Ministerio de Salud, operando de manera segura por debajo de las restricciones toxicológicas internacionales e industriales de 700 ppm para el respectivo producto.

De acuerdo con el análisis de los resultados obtenidos se puede observar que coincide con los fundamentos de las valoraciones potenciométricas descritos por Skoog, et. al (2023), quienes explican que la determinación de puntos finales mediante tratamientos matemáticos de la curva de valoración, particularmente mediante derivadas, permite localizar con mayor precisión los puntos de equivalencia en sistemas polipróticos donde los cambios de pendiente no son completamente evidentes. Desde el punto de vista químico, el comportamiento observado en los volúmenes de equivalencia permitió inferir

que la muestra no corresponde a un sistema compuesto exclusivamente por ácido fosfórico puro, sino a una mezcla compatible de especies fosfatadas. El hecho de que el volumen requerido para alcanzar el primer punto de equivalencia sea inferior a la mitad del volumen correspondiente al segundo punto de equivalencia coincide con el caso cuatro (4) propuesto para sistemas fosfatados, lo que indica la coexistencia de ácido fosfórico (H_3PO_4) y fosfato monobásico (H_2PO_4^-). Este comportamiento es consistente con los principios del equilibrio ácido-base de sistemas polipróticos trabajados por Clavijo (2002), en los cuales pueden coexistir especies intermedias derivadas de la disociación secuencial del ácido dependiendo de las condiciones químicas del medio.

Desde la perspectiva de calidad del Software, los resultados asociados a este módulo presentan coherencia con atributos relacionados con la confiabilidad, eficiencia del desempeño y precisión funcional establecidos en la norma ISO/IEC 25010 (2023), donde se establece que un producto software debe garantizar estabilidad operativa y capacidad para generar respuestas consistentes bajo condiciones reales de funcionamiento. La frecuencia de adquisición cerca de 10 Hz, junto con la capacidad aproximada de almacenamiento de 10000 registros por sesión, evidenció condiciones apropiadas para la captura continua y procesamiento de información experimental generada durante las titulaciones potenciométricas ácido-base ejecutadas en un determinado tiempo.

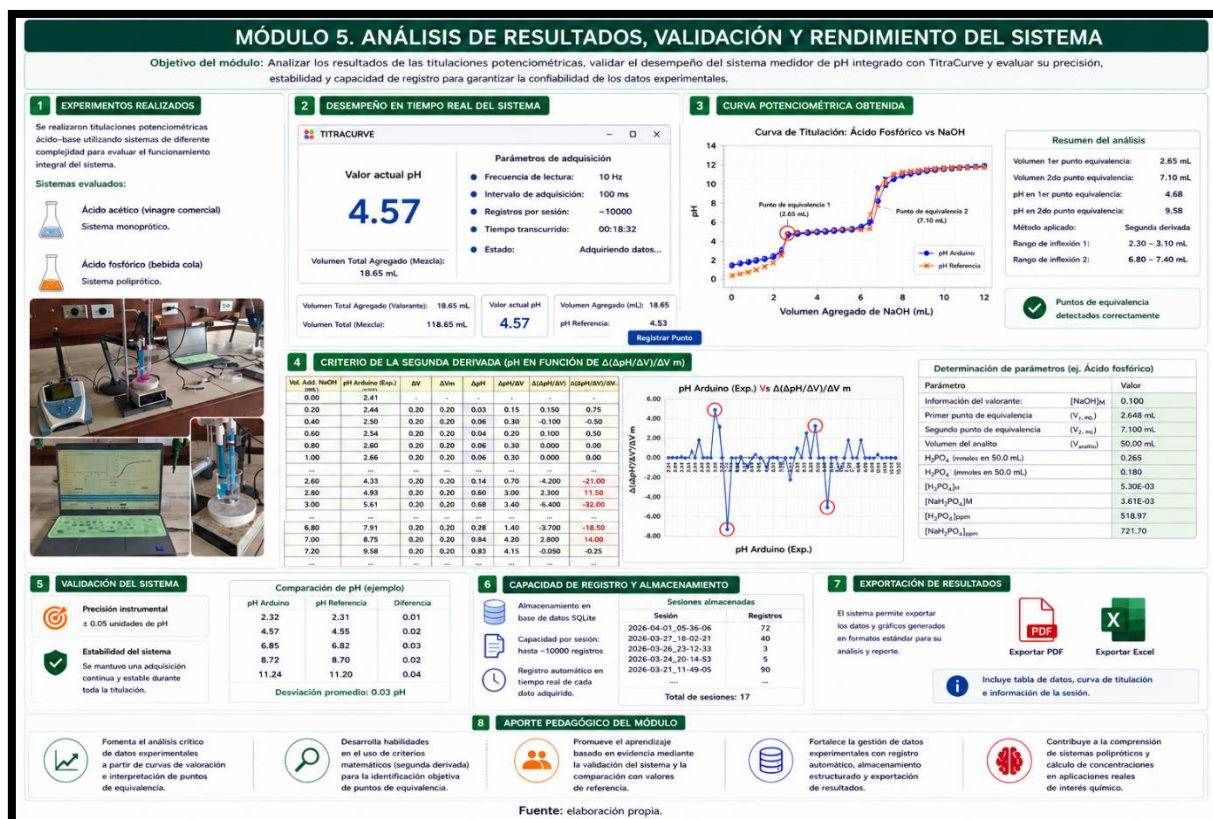
Los resultados obtenidos presentan igualmente relación con los criterios propuestos por Escobar y Cuervo (2008) para procesos de validación mediante juicio de expertos (**Anexo 8**), particularmente en dimensiones asociadas a la claridad funcional, pertinencia y utilidad del recurso tecnológico construido. Durante la implementación experimental, el sistema mostró capacidad para integrar simultáneamente procesos relacionados con adquisición, almacenamiento, representación y recuperación de información experimental, disminuyendo procedimientos manuales que generalmente incrementan errores asociados al registro y tratamiento de datos.

En relación con investigaciones aplicadas en contextos educativos similares, los resultados obtenidos presentan convergencia con lo reportado por Arellano et al. (2022), quienes señalan que los sistemas automatizados orientados a titulaciones ácido-base fortalecen procesos asociados a la comprensión conceptual y análisis experimental debido a la posibilidad de relacionar fenómenos químicos con representaciones visuales derivadas de datos reales. De manera complementaria, UNESCO (2021) y Redecker (2020) sostienen que los recursos tecnológicos adquieren valor educativo cuando generan escenarios donde los participantes construyen explicaciones fundamentadas a partir de información obtenida experimentalmente.

Desde el propósito formativo de la investigación, la validación experimental del sistema con los PQF trascendió procedimientos asociados únicamente a la adquisición instrumental (**Anexo 9**). La interpretación de curvas potenciométricas, la identificación de los puntos de equivalencia mediante criterios matemáticos y la determinación de concentraciones químicas promovieron escenarios donde los participantes establecieron

relaciones entre evidencia experimental, razonamiento cuantitativo y construcción argumentativa. Bajo estas condiciones, el software TitraCurve se configuró como una herramienta tecnológica para la medición de pH y para la elaboración gráfica de la curva de titulación en tiempo real o in situ. También se planteó como una estrategia orientada al fortalecimiento de habilidades de pensamiento crítico, interpretación y análisis de problemas sustentados en evidencias científicas, mostrando una forma diferente para la enseñanza de la química en temas relacionados con la química analítica instrumental.

Figura 35. Esquema de análisis del módulo 5.



Nota. Autores (2026)

8.1.4. Tratamiento químico-matemático del reporte de datos del software TitraCurve

Con el propósito de evidenciar el tratamiento químico-matemático realizado por los PQF con respecto al reporte de datos obtenidos a partir de la aplicación del software TitraCurve representados en la **Tabla 20**, para la determinación de ácido fosfórico en las cuatro muestras de bebidas colas (Coca-Cola, Big-Cola, Pepsi-Cola y Pow-Cola), mediante la técnica potenciométrica ácido-base, a continuación, se muestran dichos resultados a modo de ejemplo una sola vez, dado que la metodología empleada es la misma en los cuatro casos, es decir, se repiten para determinar las concentraciones analíticas molares de cada especie fosfatada presente en la solución analizada.

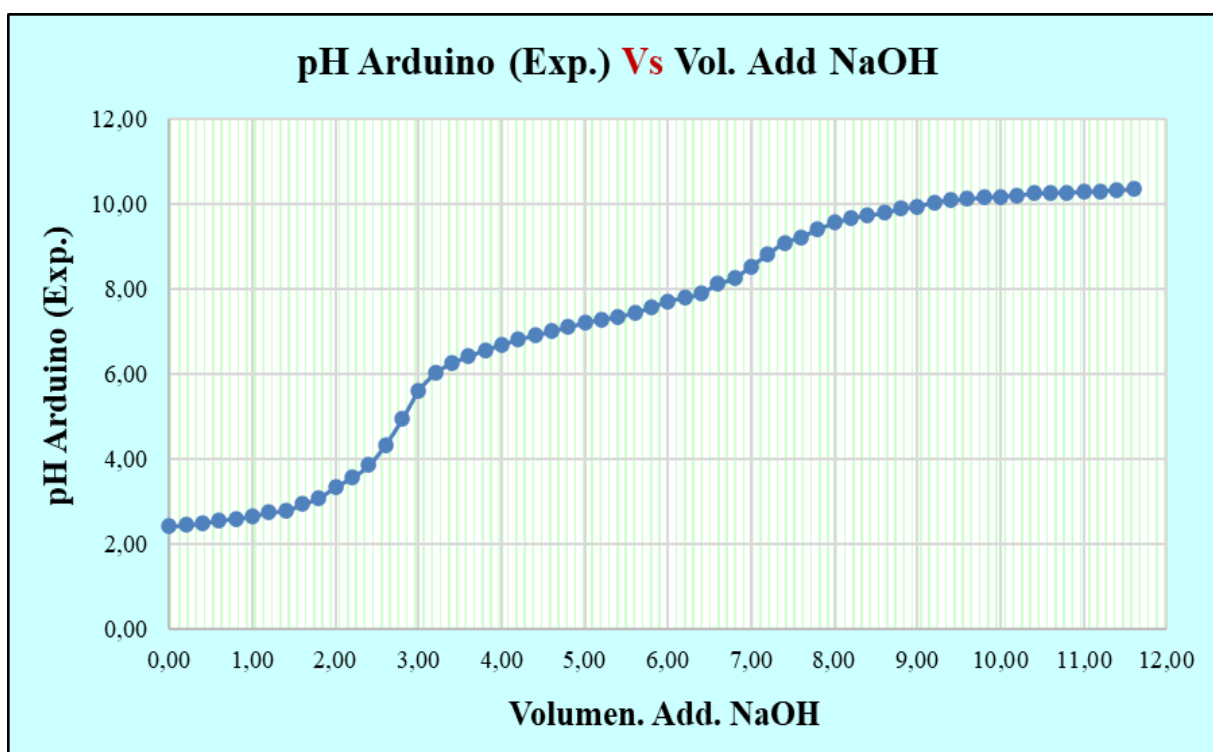
Tabla 20. Resumen de resultados obtenidos.

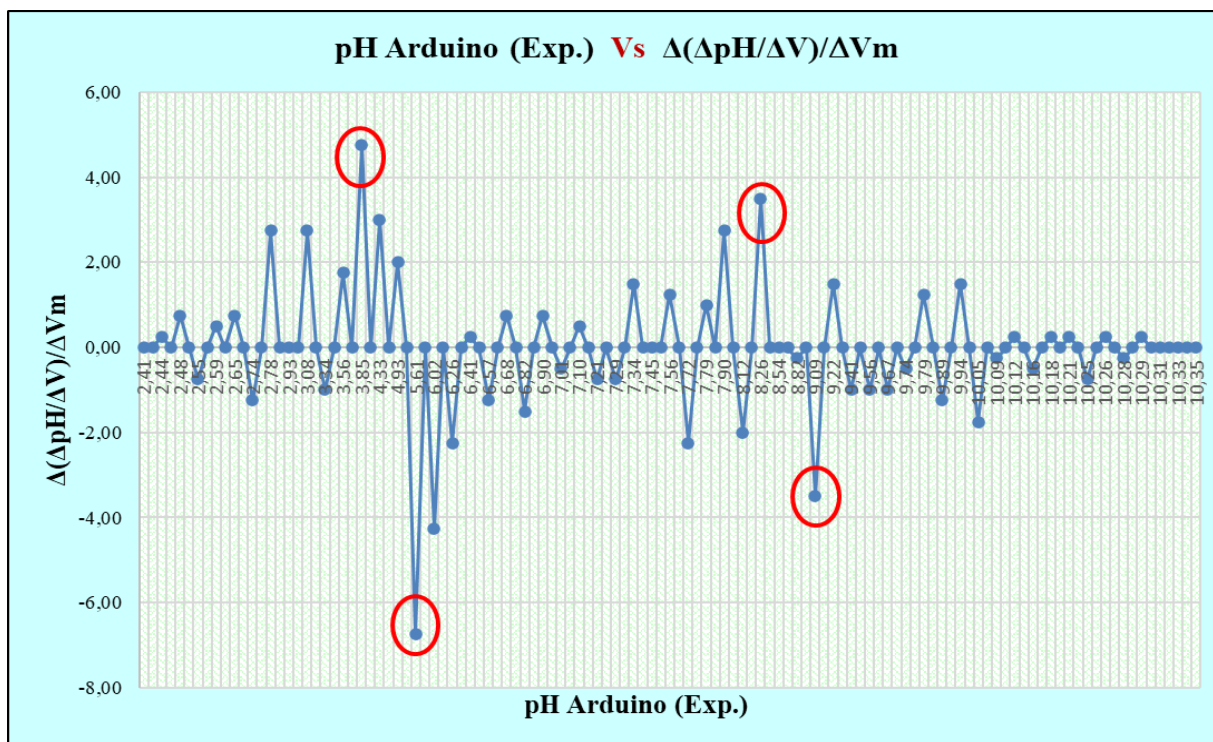
Resultados obtenidos con respecto al criterio de la segunda derivada		
Primer punto de inflexión	Volumen (1) mL	2,65
	pH (1)	4,58
Segundo punto de inflexión	Volumen (2) mL	7,10
	pH (2)	8,67

Nota. Autores (2026)

A continuación, se muestra los resultados finales tabulados por los PQF asociados a la determinación de ácido fosfórico en una muestra de Coca-Cola (**Figura 36**). Para analizar al detalle los demás resultados correspondientes a las otras muestras de análisis ver Anexos 15,16 y 17.

Figura 36. Resumen de los datos tabulados del reporte obtenido de la determinación de ácido fosfórico en la muestra de Cola-Cola.

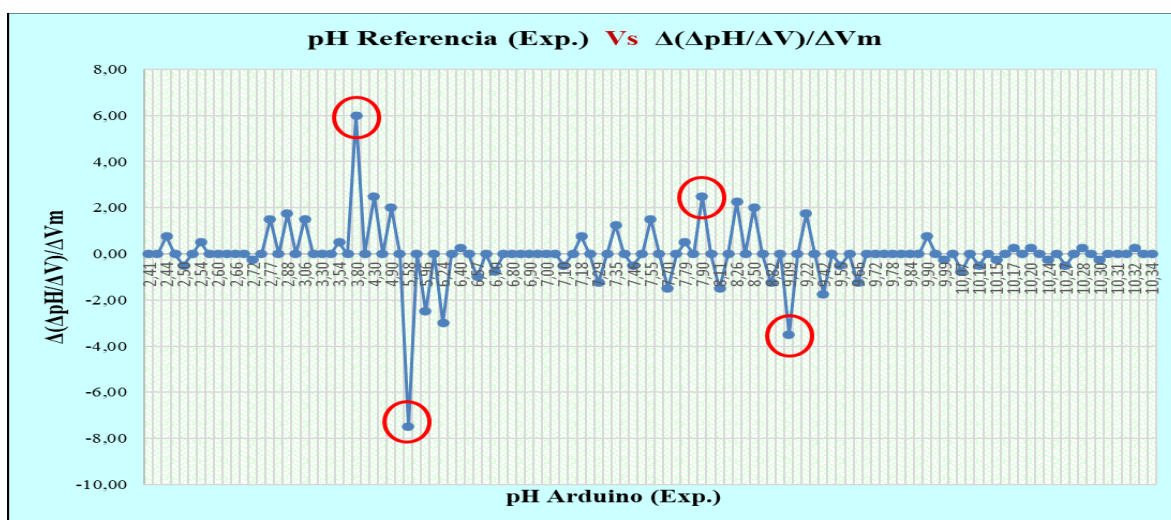
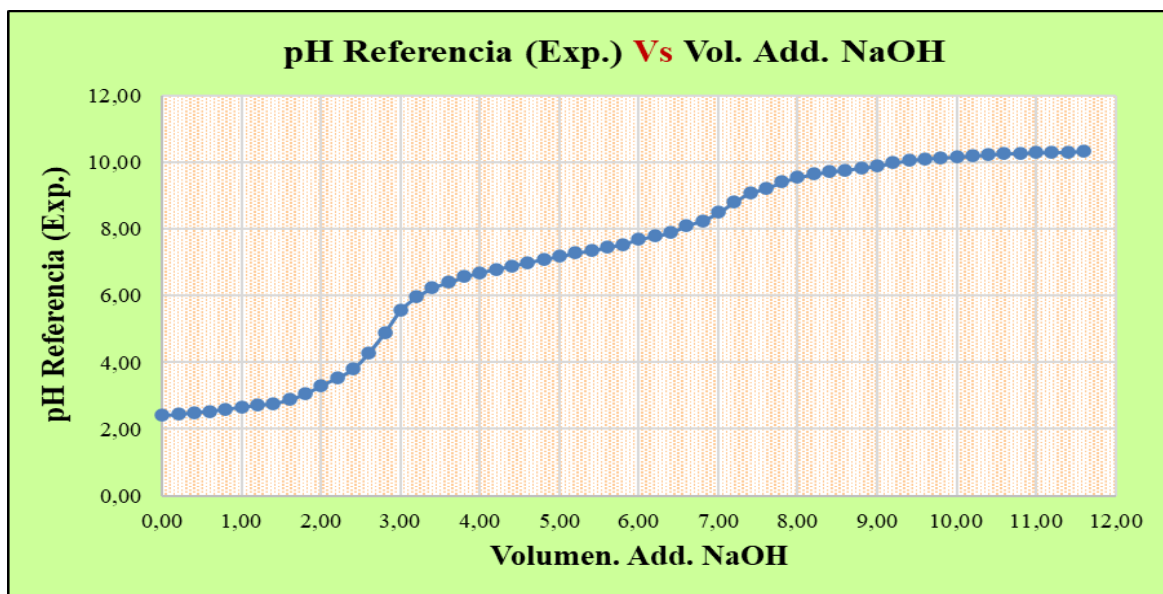




V1.P.EQUI	2,648	V2.P.EQUI	7,100
pHa.1.P.EQUI	4,577	pHa.2.P.EQUI	8,675

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE H_3PO_4 Y NaH_2PO_4 En Cola-Cola		
Información del valorante:	$[NaOH]_M$	0,100
Información del primer punto de equivalencia:	$V_{1.P.EQUI} (mL)$	2,648
Información del Segundo punto de equivalencia:	$V_{2.P.EQUI} (mL)$	7,100
Información del analito:	$V_{alicuota} (mL)$	50,00
A = mmoles de ácido fosfórico que hay en 50,0 mL:	$H_3PO_4 (mmoles)$	0,265
B = mmoles del ion fosfato monobásico que hay en 50,0 mL:	$H_2PO_4^- (mmoles)$	0,180
Concentración molar del ácido fosfórico:	$[H_3PO_4]_M$	5,30E-03
Concentración molar del fosfato monobásico de sodio:	$[NaH_2PO_4]_M$	3,61E-03
Concentración en ppm del ácido fosfórico:	$[H_3PO_4]_{ppm}$	518,97
Concentración en ppm del fosfato monobásico de sodio:	$[NaH_2PO_4]_{ppm}$	721,70

Nota. Resultados obtenidos PQF (2026)



V1.P.EQUI	2,667 mL	V2.P.EQUI	6,817 mL
pHa.1.P.EQUI	4,591	pHa.2.P.EQUI	8,396

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE H_3PO_4 Y NaH_2PO_4		
Información del valorante:	$[NaOH]_M$	0,100
Información del primer punto de equivalencia:	$V_{1.P.EQUI} (mL)$	2,667
Información del Segundo punto de equivalencia:	$V_{2.P.EQUI} (mL)$	6,817
Información del analito:	$V_{alicuota} (mL)$	50,00
A = mmoles de ácido fosfórico que hay en 50,0 mL:	$H_3PO_4 (mmoles)$	0,267
B = mmoles del ion fosfato monobásico que hay en 50,0 mL:	$H_2PO_4^- (mmoles)$	0,148
Concentración molar del ácido fosfórico:	$[H_3PO_4]_M$	5,33E-03
Concentración molar del fosfato monobásico de sodio:	$[NaH_2PO_4]_M$	2,97E-03
Concentración en ppm del ácido fosfórico:	$[H_3PO_4]_{ppm}$	522,67
Concentración en ppm del fosfato monobásico de sodio:	$[NaH_2PO_4]_{ppm}$	593,30

Nota. Resultados obtenidos PQF (2026)

8.3. Fase de finalización: Implementación y evaluación de la secuencia de actividades.

La fase de finalización correspondió a la implementación de la secuencia didáctica diseñada bajo las estrategias del modelo integrado Thinking Classroom y las 7E, orientada en el fortalecimiento de las habilidades de pensamiento crítico interpretación y análisis de problemas. Para ello, se tomó como referencia la línea base obtenida mediante la aplicación del test de Halpern y se incorporó el Software TitraCurve como recurso de apoyo para la enseñanza de la potenciometría ácido-base.

8.3.1. Actividad # 1 Comprendo la potenciometría ácido-base: Relaciones conceptuales y procesos de titulación

Habilidad de pensamiento: Interpretación.

En relación con las representaciones elaboradas por los PQF durante la primera parte de la Actividad # 1 (**Anexo 2**), los resultados evidenciaron que, de los 15 PQF, 14 fueron clasificados en el nivel multiestructural de la Taxonomía SOLO, mientras 1 se ubicó en el nivel uniestructural. Estos resultados mostraron que el nivel de complejidad del grupo se concentró principalmente en el nivel multiestructural, caracterizado por la identificación y organización de diversos elementos relevantes presentes en las representaciones, aunque sin lograr establecer relaciones entre ellos para construir una comprensión integrada del fenómeno, tal como lo plantea Biggs (2005). En consecuencia, el análisis que se presentó a continuación se centró en las representaciones correspondientes a los PQF clasificados en este nivel, dado que constituyen la tendencia predominante del grupo y permiten caracterizar la manifestación de la habilidad de pensamiento crítico interpretación, específicamente de la sub-habilidad categorizar información, entendida como la capacidad para organizar la información en categorías significativas que permitan comprenderla, describirla y diferenciarla de acuerdo con criterios específicos (Facione, 2011). Aunque la representación clasificada en el nivel uniestructural fue considerada durante el proceso de categorización, esta no constituyó el eje central de la interpretación debido a que represento un único caso dentro del grupo.

Particularmente, el mapa conceptual elaborado por el PQF 10 (**Anexo 2**) evidenció una organización del conocimiento centrada en la diferenciación de conceptos relacionados con la potenciometría ácido-base. La representación mostró que el PQF reconoce diversos elementos asociados a la valoración potenciométrica y los agrupa según su función dentro del fenómeno químico estudiado. Esta organización permitió inferir que el PQF logró identificar categorías conceptuales relacionadas con los reactivos involucrados en la titulación, las propiedades de los electrolitos (fuertes y débiles), los procesos de equilibrio químico y los elementos característicos de la curva de valoración. Más que la simple presencia de conceptos, resulta relevante la manera que estos son agrupados, pues evidencia la capacidad de reconocer semejanzas y diferencias entre los componentes de una misma temática. Desde la perspectiva de Facione (2011), esta acción constituye una manifestación clara de la categorización de información al permitir organizar el conocimiento en conjuntos conceptuales coherentes.

De forma similar, el PQF 12 construyó una representación (**Anexo 2**) en la que se distinguen categorías asociadas con la valoración ácido-base, la medición potenciométrica y la interpretación de los cambios observados durante el proceso experimental. Esta organización refleja que el PQF no se limita a reconocer conceptos aislados, sino que logra clasificarlos de acuerdo con su función dentro del sistema estudiado. Sin embargo, aunque se observa una adecuada diferenciación de la información, las relaciones establecidas continúan siendo predominantemente descriptivas. Esto sugirió que el PQF reconoce múltiples aspectos del fenómeno químico y logra organizarlos en categorías significativas, pero aún no establece relaciones integradoras que permitan comprender de manera global el comportamiento del sistema potenciométrico.

Asimismo, el PQF 3 presentó una representación caracterizada por la organización de las múltiples categorías relacionadas con la potenciometría ácido-base. En este caso, el PQF logró distinguir información asociada a los electrólitos, las variables involucradas en la titulación y las diferentes regiones de las curvas de valoración. Esta estructura evidencia un proceso de categorización más amplio, en el que se reconoció una mayor diversidad de elementos conceptuales. Sin embargo, aunque las categorías construidas resultan pertinentes y coherentes con la temática abordada, las relaciones establecidas entre ellas no alcanzan un nivel de integración suficiente para explicar el comportamiento global del sistema químico estudiado.

De manera general, las representaciones analizadas se evidenciaron que los PQF lograron identificar, diferenciar y clasificar múltiples conceptos asociados a la potenciometría ácido-base, organizándolos en categorías conceptuales coherentes. Esta tendencia coincide con la definición de categorizar información de acuerdo con criterios que permitan comprenderla y describirla. En consecuencia, los PQF evidencian avances significativos en la organización conceptual del conocimiento; sin embargo, las representaciones continúan mostrando limitaciones para establecer relaciones integradoras entre las categorías construidas. Por esta razón, se consideró que el nivel de complejidad observados corresponde predominantemente al nivel multiestructural de la Taxonomía SOLO, caracterizado por el reconocimiento de múltiples elementos relevantes de una temática sin alcanzar aún una comprensión relacional de los mismos.

Estos hallazgos se interpretaron a la luz de las estrategias implementadas durante la intervención. En primer lugar, la estrategia tipo de tareas usadas del modelo integrado Thinking Classroom tuvo una incidencia directa en el desarrollo de la sub-habilidad categorizar información, debido a que la elaboración del mapa conceptual exigió a los PQF seleccionar, diferenciar, organizar y representar los conceptos trabajados durante la actividad. Esto favoreció procesos de estructuración conceptual que permitieron evidenciar cómo los PQF organizaban cognitivamente la información relacionada con la potenciometría ácido-base.

De igual manera, la estrategia ¿Cómo se dispone el mobiliario? favoreció la creación de espacios de intervención que promovieron el intercambio de ideas y la

confrontación de conocimientos previos entre los PQF. Aunque el producto final fue individual, las discusiones desarrolladas durante la actividad contribuyen a que los PQF revisaran, completamente y reorganizaran sus estructuras conceptuales antes de plasmarlas en sus representaciones gráficas.

Por otra parte, desde el modelo de las 7E, la estrategia Elicitar desempeña un papel fundamental en los resultados obtenidos, ya que esta etapa busca reconocer y activar los conocimientos previos de los PQF como punto de partida para construir nuevos aprendizajes. En este sentido la elaboración de los mapas conceptuales permitió exteriorizar las estructuras conceptuales iniciales de los PQF y evidenciar la manera en que organizaban la información relacionada con la potenciometría ácido-base. Así, las categorías identificadas en los mapas reflejaron no solo los conceptos trabajados durante la intervención, sino también los procesos de reorganización conceptual derivados de la articulación entre los conocimientos previos y los nuevos contenidos abordados.

Finalmente, desde la perspectiva de la pirámide de alcance **Figura 37**, los resultados sugieren una tendencia predominante hacia procesos asociados con la identificación, diferenciación y organización conceptual de la información. Lo anterior se evidencia en la capacidad de los PQF para construir categorías coherentes y clasificar conceptos relevantes dentro de la temática estudiada. Sin embargo, la limitada integración observada entre dichas categorías indicó que el alcance logrado se concentró principalmente en el nivel multiestructural, construyendo una base importante para el desarrollo posterior de niveles superiores de comprensión, en los cuales los PQF pudieron establecer relaciones más profundas, explicativas e integradas entre los diferentes elementos que conforman la potenciometría ácido-base.

Figura 37. Pirámide de alcance habilidad de interpretación, Actividad # 1.



Nota. Autores (2026)

Habilidad de pensamiento: Análisis de problemas.

En relación con las preguntas respondidas por los PQF durante la segunda parte de la Actividad #1 (**Anexo 2**), los resultados evidenciaron que, de los 15 PQF, 13 fueron clasificados en el nivel multiestructural de la Taxonomía SOLO, mientras que 2 se ubicaron en el nivel uniestructural. Estos resultados muestran que el nivel de complejidad del grupo se concentró principalmente en el nivel multiestructural, caracterizado por la identificación de diversos elementos relevantes presentes en las situaciones planteadas, aunque sin establecer relaciones entre ellos para construir una argumentación integrada, de acuerdo con las características descritas por Biggs (2005). En consecuencia, el análisis que se presenta a continuación se centró en las respuestas representativas de los PQF clasificados en este nivel, dado que constituyeron la tendencia predominante del grupo y permitieron caracterizar la manifestación de la habilidad de pensamiento crítico análisis, específicamente de la sub-habilidad analizar argumentos, entendida como la capacidad para identificar las relaciones inferenciales entre afirmaciones, razones, conceptos, juicios u opiniones, permitiendo reconocer cómo se estructuran y sustentan los argumentos (Facione, 2011). Aunque las respuestas correspondientes al nivel uniestructural fueron consideradas durante el proceso de categorización, estas no constituyen el eje central de la interpretación, ya que representaron una proporción menor de PQF y evidencian un nivel de complejidad distinto al predominante.

En este sentido, la actividad propuesta solicitó el análisis de una curva de titulación potenciométrica correspondiente a la valoración de ácido fosfórico (H_3PO_4) con hidróxido de sodio (NaOH), con el propósito de identificar las regiones de pre-equivalencia, equivalencia y post-equivalencia, así como explicar las variaciones observadas en el pH a partir de las especies químicas predominantes. La naturaleza de la tarea exigía interpretar información representada gráficamente, reconocer evidencias relevantes y construir explicaciones sustentadas en conceptos químicos asociados a los procesos de neutralización y equilibrio ácido-base.

Una de las respuestas proporcionadas por el PQF 6 señala:

“La región de pre-equivalencia está aproximadamente entre 50 y 52 mL donde el pH aumenta lentamente porque aún predomina el ácido”

En esta producción se identifican diversos elementos conceptuales asociados al comportamiento de la curva de titulación, entre ellos la delimitación de una región específica, la descripción de la tendencia observada en el pH y la referencia a la predominancia de una especie química como explicación del fenómeno. La respuesta incorporó información presente en la representación gráfica y la utilizó para sustentar una interpretación del comportamiento del sistema ácido-base.

Desde la habilidad de pensamiento crítico, la respuesta evidencio la sub-habilidad analizar argumentos, debido a que este estableció una afirmación sustentada en una razón relacionada con la composición química de la disolución. La explicación construida vinculó el comportamiento gradual del pH con la predominancia de especies ácidas, lo

que permitió identificar una estructura argumentada básica basada en la utilización de evidencias para respaldar una conclusión (Facione, 2011).

Sin embargo, el argumento presentado se desarrolló de manera parcial. Aunque se reconoció la presencia predominante de especies ácidas, no se examinaron las relaciones entre dicha predominancia, los equilibrios ácido-base presentes en la solución y la capacidad amortiguadora característica de esta región de la titulación. La explicación se limita a asociar dos elementos de fenómeno sin profundizar en los mecanismos químicos que justifican dicha relación.

La curva analizada muestra un incremento gradual del pH previo al primer cambio pronunciado de pendiente alrededor de los 52 mL. Esta evidencia permitió establecer conexiones con las coexistencias de especies conjugadas y con los procesos de amortiguación propios de los sistemas ácido-base (Skoog 2023). No obstante, tales relaciones no aparecen incorporadas en la argumentación construida.

En consecuencia, la respuesta se ubicó en el nivel multiestructural de la Taxonomía SOLO, debido a que incorporó varios elementos relevantes para la comprensión del fenómeno, pero estos permanecen organizados de manera aditiva. Se identificó la región de la curva, la tendencia del pH y la especie predominante, aunque sin establecer relaciones que permiten construir una explicación integrada del comportamiento químico observado (Biggs, 2005).

Otra de las respuestas por parte del PQF 4 expresa:

“En el punto de equivalencia se neutraliza uno de los protones del ácido fosfórico”

Esta respuesta evidenció el reconocimiento de uno de los fenómenos químicos fundamentales involucrados en la titulación de un ácido poliprótico. La neutralización es identificada como un evento relevante para explicar los cambios observados en la curva potenciométrica. Desde la sub-habilidad analizar argumentos, la respuesta incorporó una evidencia científicamente válida para sustentar la explicación elaborada. La neutralización de un protón es utilizada como fundamento para justificar la existencia de una región de equivalencia dentro del proceso de valoración.

No obstante, la argumentación permaneció limitada frente a las demandas cognitivas. La curva presenta cambios importantes en la pendiente alrededor de los 52 mL y 56 mL, evidencias que permitieron inferir transformaciones sucesivas en las especies químicas presentes en la solución. Sin embargo, este procedimiento no permitió explicar las implicaciones de dicho proceso sobre la distribución de las especies químicas ni sobre el comportamiento global del sistema. Desde la química analítica, los cambios en la pendiente de la curva de titulación reflejan las transformaciones sucesivas de las especies fosfatadas durante el proceso de neutralización, lo que permitió comprender la evolución del sistema químico a medida que avanza la titulación (Skoog, 2023).

La respuesta reconoce un elemento relevante del fenómeno, pero no estableció relaciones entre la neutralización, la formación de especies intermedias y las variaciones observadas en el pH. Esta ausencia de articulación conceptual limita el alcance explicativo de la argumentación. Por esta razón, la producción correspondió al nivel multiestructural de la Taxonomía SOLO. Aunque se identificaron conceptos pertinentes para comprender el fenómeno, estos permanecen organizados como unidades independientes de información y no como parte de una estructura explicativa integrada (Biggs, 2005).

De igual manera, el PQF 13 señaló:

“Después del punto de equivalencia hay exceso de OH⁻ y por eso aumenta el pH”

En esta producción se identificaron conceptos relacionados con la región de post-equivalencia, el exceso de base y las variaciones observadas en el pH. La respuesta estableció una relación causal entre la adición continua de titulante y el comportamiento de la solución en la etapa final de la valoración. Desde la sub-habilidad analizar argumentos, la explicación evidencia la utilización de una razón química para justificar una conclusión derivada de la observación de la curva. El exceso de iones OH⁻ es presentado como evidencia que sustenta el incremento del pH observado experimentalmente.

Sin embargo, la argumentación permanece centrada en una única variable del sistema. Aunque se reconoció correctamente la presencia de exceso de base, no se analizan las relaciones existentes entre dicha condición, las especies fosfatadas predominantes y los cambios observados en la representación gráfica. La explicación se limitó a una relación causal inmediata sin profundizar en los procesos químicos asociados.

Esta característica permitió ubicar la respuesta en el nivel multiestructural de la Taxonomía SOLO, debido a que se identifican múltiples elementos relevantes para la comprensión del fenómeno, pero sin establecer relaciones explícitas entre ellos que permitan construir una interpretación sistemática del comportamiento químico observado (Biggs, 2005).

El análisis de las respuestas evidenció el reconocimiento de información relevante presente en la curva de titulación potenciométrica, particularmente en lo relacionado con las regiones características de la valoración, las variaciones del pH, los procesos de neutralización y las especies químicas predominantes. Estas producciones constituyen manifestaciones de la habilidad de pensamiento crítico análisis, específicamente de la sub-habilidad analizar argumentos, debido a que incorporan evidencias provenientes de la representación gráfica para sustentar explicaciones relacionadas con el comportamiento del sistema ácido-base.

No obstante, al contrastar las respuestas con las exigencias cognitivas, se identifica una compresión parcial del fenómeno químico representado. Aunque las producciones escritas incorporan conceptos pertinentes, dichos elementos aparecen

organizados de manera descriptiva e independiente. Las explicaciones construidas no establecieron relaciones explícitas entre los cambios de pendiente observados en la curva, las transformaciones sucesivas de las especies químicas y los equilibrios ácido-base responsables de las variaciones registradas durante la titulación.

En consecuencia, las respuestas se ubican en el nivel multiestructural de la Taxonomía de SOLO. Este nivel se caracterizó por el reconocimiento de diversos elementos relevantes de una situación problema sin que estos sean integrados en una estructura explicativa relacional (Biggs, 2005). La identificación de regiones de valoración, especies predominantes y fenómenos de neutralización evidencia la presencia de múltiples conocimientos pertinentes; sin embargo, la ausencia de conexiones entre dichos elementos limitó la construcción de explicaciones sistemáticas sobre el comportamiento químico del sistema.

Los hallazgos obtenidos guardan relación con la estrategia tipos de tareas usadas propuesta desde el enfoque Thinking Classroom, dado que la actividad exigió interpretar una representación gráfica, seleccionar evidencias relevantes y construir explicaciones fundamentadas. Por lo que favoreció la exteriorización de los procesos de razonamiento y permite identificar la forma en que se organizan y utilizan los conocimientos químicos para sustentar argumentos científicos (Liljedahl, 2021).

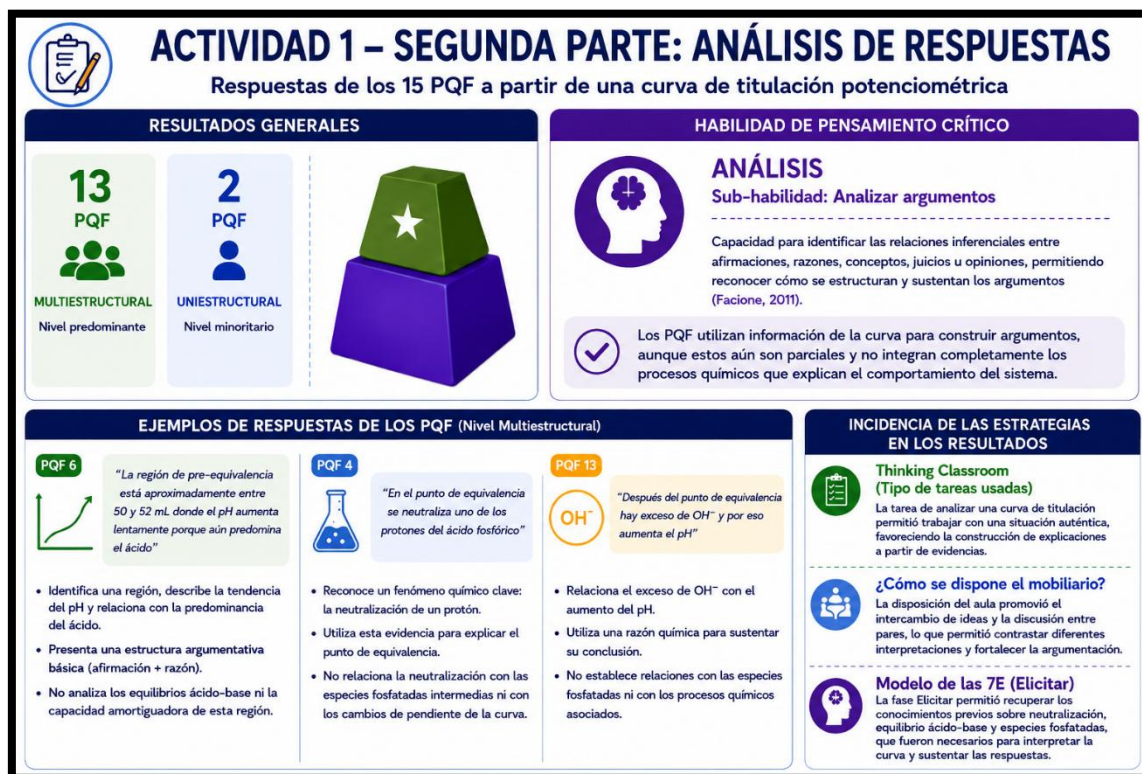
De igual manera, la estrategia ¿Cómo se dispone el mobiliario? contribuyó al desarrollo de la actividad al generar condiciones favorables para la interacción académica, el intercambio de ideas y la confrontación de interpretaciones. La organización del espacio de trabajo promovió la construcción colectiva de explicaciones y la discusión de evidencias antes de la elaboración de las respuestas individuales, aspectos coherentes con los principios del Thinking Classroom orientados a favorecer el pensamiento visible y la construcción compartida del conocimiento (Liljedahl, 2021).

Complementariamente, los resultados se articulan con la estrategia Elicitar del modelo de las 7E, debido a que la actividad permitió hacer explícitos los conocimientos previos relacionados con la interpretación de curvas de titulación, la identificación de especies químicas predominantes y la comprensión de los procesos de neutralización. En este sentido, las respuestas constituyeron una evidencia diagnóstica que posibilitó reconocer tanto los conceptos previamente construidos como las relaciones conceptuales que aún requieren fortalecimiento para el tránsito hacia niveles superiores de comprensión y argumentación científica (Eisenkraft, 2003).

Finalmente, desde la perspectiva de la pirámide de alcance **Figura 38**, los resultados evidenciaron una tendencia predominante hacia procesos asociados con la identificación y utilización de información relevante presente en la curva de titulación potenciométrica. Lo anterior se manifiesta en la capacidad de los PQF para reconocer regiones características de la valoración, identificar especies químicas predominantes y describir fenómenos como la neutralización y las variaciones de pH durante el proceso experimental. Sin embargo, la limitada articulación observada entre estos elementos conceptuales indicó que el alcance logrado se concentra en el nivel multiestructural de la

Taxonomía SOLO, caracterizado por la incorporación de múltiples aspectos pertinentes del fenómeno sin establecer relaciones entre ellos. En consecuencia, aunque las respuestas evidenciaron manifestaciones de la sub-habilidad analizar argumentos, aun se observa n dificultades para integrar las evidencias experimentales con los fundamentos teóricos que explican el comportamiento ácido-base del sistema.

Figura 38. Pirámide de alcance habilidad de análisis, Actividad # 1.



Nota. Autores (2026)

8.3.2. Actividad # 2: Exploremos en Tinkercad, una aproximación del sistema medidor de pH.

En relación con las respuestas proporcionadas por los PQF durante el desarrollo de la Actividad #2 (**Anexo 3**), los resultados evidenciaron que, de los 15 PQF, 11 fueron clasificados en el nivel relacional de la Taxonomía SOLO, y 4 en nivel multiestructural. Estos resultados muestran un predominio del nivel relacional, lo que evidencia un nivel de complejidad caracterizado por la integración de los diferentes conceptos, representaciones y evidencias presentes en la simulación para construir explicaciones coherentes del fenómeno estudiado, característica propia de este nivel según Biggs (2005). En consecuencia, el análisis que se presenta a continuación se centró en las respuestas representativas de los PQF clasificados en el nivel relacional, dado que constituyen la tendencia predominante del grupo y permitieron caracterizar la manifestación de la habilidad de pensamiento crítico interpretación, específicamente de la sub-habilidad decodificar significados, entendida como la capacidad para comprender e interpretar el significado de símbolos, representaciones, conceptos y expresiones dentro

de un contexto determinado (Facione, 2011). Aunque las respuestas correspondientes al nivel multiestructural fueron consideradas durante el proceso de categorización, estas no constituyen el eje central de la interpretación, ya que representan una menor proporción de PQF y corresponden a niveles de complejidad distintos al predominante según los criterios de la Taxonomía SOLO.

Habilidad de pensamiento: Interpretación.

En relación con las respuestas proporcionadas por los PQF para las preguntas 1 y 2 de la actividad, se evidenciaron un predominio del nivel relacional de la Taxonomía SOLO en la habilidad de pensamiento crítico interpretación, específicamente en la sub-habilidad decodificar significados. De acuerdo con Facione (2011), esta sub-habilidad consiste en comprender e interpretar el significado de símbolos, representaciones, conceptos y expresiones presentes en una situación determinada, otorgándoles sentido a partir del contexto y de los conocimientos científicos disponibles.

Respecto a la pregunta 1, los PQF debían interpretar si el sistema implementado en TinkerCad medía directamente el pH o si registraba otra variable física asociada al fenómeno electroquímico. En este sentido, una de las respuestas representativas corresponde al PQF 1, quien señala:

“El sistema no mide directamente el pH, si no el voltaje generado por el sensor, el cual es posteriormente es transformado mediante la programación en Arduino para obtener un valor de pH”.

Esta respuesta evidencia que el PQF logró decodificar el significado de la información presentada en la simulación, al reconocer que el valor de pH mostrado en la interfaz no corresponde a una medición directa, sino a la representación de un proceso de conversión basado en la diferencia de potencial registrada por el sensor. De manera similar, el PQF 15 afirma que:

“El electrodo responde a la concentración de H^+ presentes en la solución generando una diferencia de potencial que luego es utilizada para calcular el pH”.

Esta producción evidencia que el PQF interpretó el significado físico y químico de la señal generada por el electrodo, comprendiendo que el voltaje constituye la variable experimental medida que esta representa el comportamiento electroquímico del sistema.

Esta tendencia se fortaleció con las respuestas obtenidas en la pregunta 2, donde se solicitaba explicar el proceso químico o electroquímico representado por la variación de voltaje observada en la simulación. Por ejemplo, el PQF 8 manifestó que: *“La variación de voltaje representa el potencial eléctrico generado por los cambios en la actividad de iones H^+ en la solución”*, mientras que el PQF 6 indicó que: *“El voltaje cambia porque el electrodo responde a la actividad de los protones presentes en el medio, lo que permite determinar si la solución es más ácida o más básica”*. Estas respuestas muestran que los PQF atribuyeron al significado a la representación digital observada en TinkerCad, comprendiendo que la variación del voltaje simboliza un fenómeno

electroquímico asociado con la medición potenciométrica del pH y no únicamente un cambio numérico presentado por la simulación.

Asimismo, el PQF 12 señaló que:

“La diferencia de potencial observa está relacionada con el principio descrito por la ecuación de Nernst, donde los cambios en la concentración de H^+ modifican el potencial eléctrico generado por el electrodo”.

Esta respuesta evidencia la capacidad de interpretar el significado científico de la representación digital, relacionando la simulación con fundamentos teóricos propios de la electroquímica y comprendiendo el fenómeno que explica el funcionamiento del sistema potenciométrico.

Las respuestas analizadas permitieron inferir el desarrollo de la sub-habilidad decodificar significados, debido a que los PQF interpretaron correctamente el sentido de las representaciones digitales, las variables experimentales y los conceptos científicos involucrados en el funcionamiento del sistema medidor de pH. Según Facione (2011), esta sub-habilidad implica comprender el significado de la información presentada mediante diferentes formas de representación y otorgarle sentido dentro de un contexto determinado. En este caso, los PQF reconocieron que el voltaje constituye la variable medida por el sensor y comprendieron que, mediante procesos de programación y calibración, dicha señal se transforma en el valor de pH representado en la interfaz.

Lo anterior permitió ubicar las respuestas en el nivel relacional de la Taxonomía SOLO, dado que los PQF integran conceptos como concentración de iones H^+ , potencial eléctrico, funcionamiento del electrodo, ecuación de Nernst, procesamiento digital de señales y determinación del pH dentro de una estructura explicativa. Según Biggs (2005), este nivel se caracteriza por la capacidad de establecer relaciones significativas entre diferentes aspectos de una situación, construyendo una comprensión global y coherente. Precisamente, esta característica se evidenció en las respuestas analizadas, donde los PQF no describieron elementos aislados, sino que explican las relaciones existentes entre ellos para interpretar el funcionamiento del sistema.

Desde la perspectiva didáctica, los resultados obtenidos sugieren que la adaptación de la estrategia ¿Dónde trabajan los estudiantes? propuesta por Lijedahl (2021), dado que la socialización constante de ideas y la discusión de explicaciones favorecieron la construcción colectiva de conocimiento y la argumentación entre pares, permitiendo que los PQF contrastaran sus interpretaciones y fortalecieran sus explicaciones mediante el diálogo académico desarrollado en Microsoft Teams. Del mismo modo, la estrategia Explorar facilitó la observación y manipulación de la simulación, mientras que la estrategia Extender promovió la transferencia de los conocimientos construidos hacia situaciones reales relacionadas con el funcionamiento de sensores potenciométricos empleados en los laboratorios de química.

En consecuencia, con la pirámide de alcance **Figura 39** se observa que los resultados evidencian que los PQF lograron construir interpretaciones fundamentadas

acerca de la relación existente entre las variables físicas medidas por el sistema y los fenómenos electroquímicos representados en la simulación. Esta integración conceptual constituye una manifestación propia del nivel relacional de la Taxonomía SOLO y refleja avances significativos en la habilidad de interpretación específicamente en la sub-habilidad decodificar significados.

Figura 39. Pirámide de alcance habilidad de interpretación, Actividad # 2.



Nota. Autores (2026)

Habilidad de pensamiento: Análisis de problemas.

Las respuestas proporcionadas por los 15 PQF para las preguntas orientadas a la habilidad de pensamiento análisis, durante el desarrollo de la Actividad # 2 (**Anexo 3**), evidenciaron que 12 PQF fueron clasificados en el nivel relacional de la Taxonomía SOLO, 2 en el nivel relacional, lo que evidenciaron un nivel de complejidad caracterizado por la integración de afirmaciones, evidencias y conceptos presentes en las situaciones para construir argumentos coherentes, característica propia de este nivel según Biggs (2005). En consecuencia, el análisis que se presenta a continuación se centró en las respuestas representativas de los PQF clasificados en el nivel relacional, dado que constituyen la tendencia predominante del grupo y permiten caracterizar la manifestación de la habilidad de pensamiento crítico análisis, específicamente de la sub-habilidad identificar argumentos, entendida como la capacidad para reconocer las razones, afirmaciones, evidencias y conclusiones que sustentan una explicación, permitiendo identificar las relaciones lógicas que estructuran un argumento (Facione, 2011). Aunque las respuestas correspondientes a los niveles multiestructural y uniestructural fueron

consideradas durante el proceso de categorización, estas no constituyen el eje central de la interpretación, ya que representan una menor proporción de PQF y corresponden a niveles de complejidad distintos al predominante según los criterios de la Taxonomía SOLO.

Particularmente el PQF 1 argumentó: *“El código usa una relación lineal entre voltaje y pH, lo cual simplifica el modelo”*, pero simultáneamente reconoce que *“el pH es una escala logarítmica”*, razón por la cual *“Esta aproximación puede generar errores y no representa completamente el comportamiento real del sistema”*. Esta respuesta evidenció la identificación de una afirmación principal la simplificación del modelo y de las razones que permiten cuestionar dicha decisión, estableciendo una relación entre la naturaleza matemática pH y las limitaciones de la simulación. Asimismo, al señalar que la simulación no considera factores reales como calibración, temperatura o interferencias, el PQF incorporó evidencias adicionales para sustentar la conclusión de que el modelo resulta útil para fines de aprendizaje, aunque no representa completamente el funcionamiento de un sensor real. Lo anterior pone de manifiesto una capacidad para reconocer y relacionar distintos argumentos dentro de una misma explicación.

De forma similar, el PQF 8 afirmó que: *“Al usar una relación lineal, estoy simplificando el modelo, pero no represento bien que el pH es logarítmico”*, identificando explícitamente la tensión existente entre la facilidad de modelado y la fidelidad conceptual del suceso químico. Adicionalmente, argumenta que *“los valores pueden ser aproximados y menos precisos”*. La respuesta evidenció que el PQF no solo reconoce la relación causal entre las decisiones de programación y los resultados obtenidos, sino que también identifica los argumentos que sustentan dicha relación. De este modo, estableció una secuencia lógica que vincula las simplificaciones realizadas en el modelo con sus efectos sobre la representación del fenómeno y la calidad de los resultados.

Por su parte, el PQF 13 construyó una argumentación de mayor complejidad conceptual al señalar que la linealidad observada en algunos rangos de funcionamiento del sensor se encuentran asociada a la ecuación de Nernst y que dicha linealidad constituye únicamente una representación aparente de una relación logarítmica subyacente. Al afirmar que una relación estrictamente lineal *“Puede ocultar el hecho de que pequeños cambios en la concentración de H^+ pueden implicar grandes variaciones en pH”*, PQF identificó una consecuencia conceptual derivada de la simplificación del modelo. Asimismo, reconoció que factores como la calibración, temperatura, interferencia de otros iones y la pérdida de confiabilidad de las mediciones pueden afectar la interpretación de los resultados experimentales. Estas relaciones evidenciaron una integración argumentativa en la que los principios químicos, instrumentales y computacionales son utilizados como fundamentos para sustentar una explicación coherente.

De manera analógica, el PQF argumentó que: *“Implementar una relación lineal en el código simplifica la programación, pero oculta la naturaleza logarítmica de la variable real”*. Para sustentar esta afirmación, relaciona la ecuación de Nernst con la

dependencia entre el voltaje medido y la actividad de protones, indicando que *“el pH es en realidad el logaritmo negativo de esa actividad”*. Además, identificó argumentos asociados al error alcalino, la sensibilidad a la temperatura, el desgaste del electrodo y la necesidad de compensaciones instrumentales, estableciendo conexiones entre estos factores y las posibles desviaciones de la medición real. La respuesta evidenció una comprensión integrada de las razones que explican las limitaciones del modelo y de las implicaciones que estas tienen sobre la interpretación de los datos obtenidos.

De manera general, las respuestas analizadas muestran que los PQF lograron identificar los argumentos presentes en la situación planteada y reconocer las razones que sustentan las limitaciones de una representación lineal del pH. En concordancia con Facione (2011), los PQF identifican afirmaciones, evidencias y conclusiones, estableciendo relaciones entre la naturaleza logarítmica del pH, los principios de funcionamiento de los sensores potenciométricos y las restricciones inherentes a los procesos de simulación computacional. En este sentido, las respuestas trascienden la simple enumeración de conceptos y evidencian procesos de articulación argumentativa orientados a explicar las consecuencias de las decisiones de modelado adoptadas.

Estos resultados pueden interpretarse a la luz de las estrategias implementadas durante la intervención didáctica. En primer lugar, la estrategia *¿Dónde trabajan los estudiantes?* del modelo integrado Thinking Classroom tuvo una incidencia significativa en el desarrollo de la sub-habilidad identificar argumentos. Según Liljedahl (2021), esta estrategia busca transformar los espacios tradicionales de aprendizaje mediante entornos que favorezcan la participación activa y construcción colectiva del conocimiento. En este caso, el trabajo desarrollado en el entorno virtual de simulación Tinkercad permitió que los PQF interactúan directamente con el modelo del sistema medidor de pH, analizaran las decisiones de programación implementadas y contrastaran los resultados obtenidos con los fundamentos teóricos de la potenciometría ácido-base. Como consecuencia, los PQF construyeron argumentos sustentados en evidencias observadas durante la simulación, relacionando conceptos como la naturaleza logarítmica del pH, la ecuación de Nernst y las limitaciones inherentes a los procesos de modelación computacional.

Por otra parte, desde el modelo de las 7E, la estrategia Explorar desempeñó un papel fundamental en los resultados obtenidos. De acuerdo con Eisenkraft (2003), esta etapa promueve la interacción directa de los estudiantes con situaciones problemáticas, favoreciendo la construcción inicial de explicaciones a partir de la observación y la experimentación. En la presente investigación, la interacción con la simulación permitió que los PQF examinaran el comportamiento del sistema medidor de pH y reconocieran las simplificaciones incorporadas en el modelo computacional.

Asimismo, la estrategia Extender favoreció la transferencia y aplicación de los conocimientos construidos hacia contextos diferentes a los abordados inicialmente. Según Eisenkraft (2003), esta etapa busca que los estudiantes amplíen y utilicen los aprendizajes adquiridos para explicar nuevas situaciones o resolver problemas más complejos. En este sentido, los PQF trascendieron el análisis de la situación e incorporaron en sus

argumentos factores propios del contexto experimental real, tales como la calibración del sensor, la influencia de la temperatura, las interferencias iónicas, el error alcalino y el desgaste del electrodo. La inclusión de estos elementos evidencia la capacidad de extrapolar los conocimientos desarrollados durante la simulación hacia escenarios auténticos de medición potenciométrica. Lo anterior permitió la construcción de explicaciones fundamentadas que integran conocimientos provenientes de la química analítica, y específicamente, de la sub-habilidad identificar argumentos propuestas por Facione (2011).

En consecuencia, desde la perspectiva de la pirámide de alcance **Figura 40**, se observó que los resultados evidencian que los PQF lograron identificar y articular argumentos fundamentales en principios químicos, electroquímicos e instrumentales para explicar las limitaciones y alcances del sistema medidor de pH, la ecuación de Nernst, las condiciones experimentales y las decisiones de programación implementadas en el modelo, utilizando estos elementos como evidencias para sustentar explicaciones. Esta integración de razones, evidencias y conclusiones constituye una manifestación propia del nivel relacional de la Taxonomía SOLO, ya que los diferentes elementos conceptuales dejan de presentarse de manera aislada ya pasan a conformar una estructura argumentativa coherente. En este sentido, los resultados reflejan avances significativos en la habilidad de análisis, específicamente en la sub-habilidad identificar argumentos, al evidenciar la capacidad de los PQF para reconocer las bases que sustentan una afirmación y establecer relaciones lógicas entre los distintos componentes involucrados en la explicación científica. (Facione, 2011).

Figura 40. Pirámide de alcance habilidad de análisis, Actividad # 2.



Nota. Autores (2026)

8.3.3. Práctica de laboratorio: Determinación potenciométrica de ácido fosfórico en bebidas cola mediante la integración del Software TitrCurve.

En la ejecución de la práctica de laboratorio (**Anexo 4**), se tuvieron en cuenta la aplicación de las estrategias del modelo integrado Thinking Classroom y las 7E en la caracterización de las habilidades de pensamiento crítico. En este caso en relación con las estrategias del modelo integrado Thinking Classroom utilizadas obtuvimos que la estrategia grupos colaborativos se implementó mediante la conformación de equipos de trabajo heterogéneos integrados por PQF con diferentes fortalezas académicas y niveles de comprensión conceptual. Durante la práctica de laboratorio para la determinación de ácido fosfórico en bebidas cola, cada grupo asume la responsabilidad de preparar la muestra, realizar la valoración potenciométrica y analizar los resultados obtenidos mediante el Software TitrCurve, desarrollado por los docentes investigadores **Figura 41**. Esta dinámica favoreció la discusión de los procedimientos experimentales, la interpretación conjunta de los datos y la construcción colectiva de explicaciones fundamentadas en principios de química analítica.

Figura 41. Software TitrCurve en paralelo con el potenciómetro de referencia.



Nota. Autores (2026)

De acuerdo con Lijedahl (2021), los grupos colaborativos favorecen la participación activa y la construcción social del conocimiento mediante la interacción constante entre los estudiantes. En este contexto, los PQF analizarán conjuntamente las curvas de titulación generadas en tiempo real por el Software TitrCurve y compararán los resultados obtenidos con aquellos registrados por un potenciómetro de referencia disponible en los laboratorios de química de la Universidad Pedagógica Nacional. Esta comparación favorece el desarrollo de la habilidad de interpretación, ya que los PQF

atribuyen significado a los datos experimentales, reconocen el comportamiento de la curva potenciométrica y relacionan las variaciones de pH con los procesos de neutralización y desprotonación sucesiva característicos del ácido fosfórico. De igual manera, favoreció la habilidad de análisis, puesto que los PQF examinan las relaciones existentes entre las evidencias experimentales obtenidas, los principios químicos involucrados y las posibles diferencias observadas entre ambos sistemas de medición, identificando argumentos relacionados con la precisión instrumental, la confiabilidad de los datos y la validez de los resultados obtenidos.

En relación con la estrategia ¿Cómo se dispone el mobiliario? se implementó mediante la organización del laboratorio en estaciones de trabajo que faciliten la interacción permanente entre los integrantes de cada grupo y el acceso simultáneo a los equipos experimentales. Cada estación dispone del sistema de valoración potenciométrica conectado al Software TitrCurve y el acceso a los datos generados por el potenciómetro de referencia, permitiendo que los PQF observen en tiempo real la evolución de la curva de titulación y analicen el comportamiento del sistema químico estudiado.

Según Liljedahl (2021), la disposición física del espacio influye en la calidad de las interacciones académicas y en la construcción del pensamiento. En esta práctica, la organización del mobiliario favorece la discusión inmediata de los resultados experimentales, la comparación entre las curvas obtenidas por diferentes grupos y la identificación de las regiones de pre-equivalencia, equivalencia y post-equivalencia características de la valoración potenciométrica del ácido fosfórico. Esta dinámica contribuyó al desarrollo de la habilidad de interpretación, debido a que los PQF construyen significados a partir de las representaciones gráficas obtenidas durante la titulación y relacionan los cambios químicamente en el sistema. Paralelamente, fortaleció la habilidad de análisis, ya que los PQF contrastan resultados, identifican patrones y establecen relaciones entre los datos experimentales y los fundamentos teóricos de la potencimetría ácido-base, favoreciendo la construcción de explicaciones científicamente fundamentadas.

Con respecto a las estrategias de las 7E, se aplicó Elaborar la cual se desarrolló una vez obtenidos y analizados los datos experimentales. Durante esta etapa, los PQF utilizan la información proporcionada por el Software TitrCurve y el potenciómetro de referencia para profundizar en la comprensión de los sucesos químicos observados durante la valoración potenciométrica. De acuerdo con Eisenkraft (2003), esta fase busca ampliar y transferir los conocimientos construido hacia nuevas situaciones y contextos de aplicación.

En este sentido, los PQF interpretan las curvas de titulación obtenidas para determinar la concentración de ácido fosfórico presente en las bebidas cola y relacionan los puntos de equivalencia observados con los procesos de desprotonación sucesiva característicos de este ácido poliprótico. Este proceso favoreció la habilidad de interpretación, ya que permitió comprender el significado químico de los datos obtenidos y relacionarlos con conceptos como equilibrio químico, neutralización y constantes de

disociación ácida. Asimismo, la estrategia Elaborar fortaleció la habilidad de análisis al exigir que los PQF establezcan relaciones entre los resultados experimentales, los fundamentos teóricos y la información obtenida mediante los diferentes sistemas potenciométricos.

Adicionalmente, la comparación entre los resultados obtenidos mediante TitraCurve y aquellos registrados por el potenciómetro de referencia permite evaluar la precisión de los datos experimentales y reflexionar sobre la importancia de la aplicación instrumental en los procesos de análisis químico. Esta actividad favoreció la identificación de evidencias, la formulación de argumentos y la construcción de conclusiones fundamentadas, aspectos estrechamente relacionados con la habilidad de análisis propuesta por Facione (2011). A su vez, permitió transferir los conocimientos construidos hacia contextos reales de laboratorio, fortaleciendo la comprensión de la potenciometría como una técnica analítica empleada para la determinación cuantitativa de especies químicas en muestras de interés.

Por lo tanto, la implementación conjunta de las estrategias grupos colaborativos, ¿Cómo se dispone el mobiliario? y Elaborar, permitieron que la práctica de laboratorio trascienda la ejecución mecánica de un procedimiento experimental y se convierta en un escenario para la construcción activa del conocimiento químico. Mientras los grupos colaborativos favorecieron la discusión, argumentación y análisis de las evidencias obtenidas durante la valoración potenciométrica, la disposición estratégica del mobiliario facilita la observación compartida, la comparación de resultados y la construcción colectiva de interpretaciones acerca del comportamiento químico del sistema estudiado. Por su parte, la estrategia Elaborar promovió la profundización conceptual al permitir que los PQF relacionaran los datos experimentales con los fundamentos de la potenciometría ácido-base, la naturaleza poliprótica del ácido fosfórico y los principios de validación instrumental. En conjunto, estas estrategias favorecieron el desarrollo articulado de las habilidades de interpretación y análisis, al propiciar que los PQF comprendan el significado de la información experimental, establezcan relaciones entre evidencias y explicaciones científicas, construyan argumentos fundamentados y formulen conclusiones sustentadas en principios propios de la química analítica.

8.3.4. Actividad # 3 Elaboración de una UVE heurística

Habilidad de pensamiento: Interpretación.

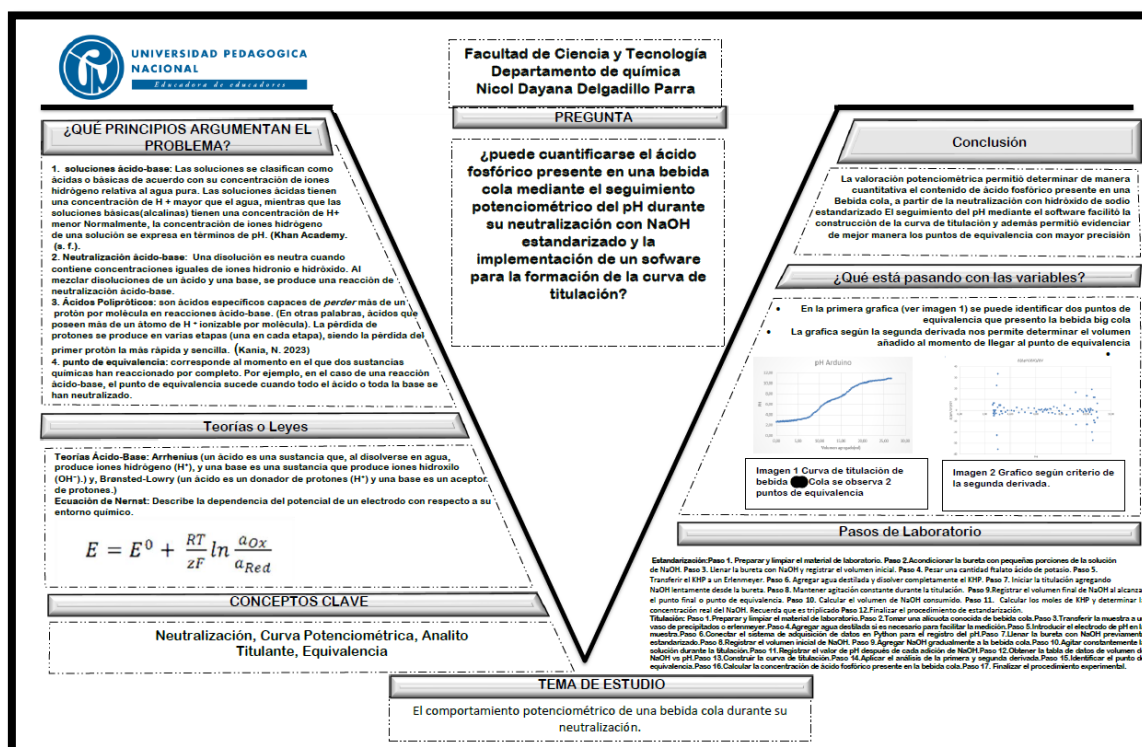
Las representaciones en forma de UVE heurística elaboradas por los PQF durante la primera parte del informe de laboratorio (**Anexo 4**), asociado a la determinación potenciométrica de ácido fosfórico en bebidas cola (Coca-Cola, Pepsi-Cola, Big-Cola y Pow-Cola), evidencian que, de los 15 PQF, 11 fueron clasificados en el nivel relacional de la Taxonomía SOLO, mientras que 4 se ubicaron en el nivel multiestructural. Estos resultados muestran un predominio del nivel relacional, lo que evidencia un nivel de complejidad caracterizado por la integración de los conceptos, principios, registros experimentales y representaciones presentes en la UVE heurística para construir interpretaciones coherentes del fenómeno estudiado, característica propia de este nivel

según Biggs (2005). En consecuencia, el análisis que se presenta a continuación se centra en las representaciones correspondientes a los PQF clasificados en el nivel relacional, dado que constituyen la tendencia predominante del grupo y permiten caracterizar la manifestación de la habilidad de pensamiento crítico interpretación, específicamente de la sub-habilidad decodificación de significados, entendida como la capacidad para interpretar y atribuir significado a la información presentada mediante diferentes formas de representación, estableciendo relaciones que permitan comprender y explicar un fenómeno de manera fundamentada (Facione, 2011). Aunque las representaciones correspondientes al nivel multiestructural fueron consideradas durante el proceso de categorización, estas no constituyen el eje central de la interpretación, ya que representan una menor proporción de los PQF y corresponden a un nivel de complejidad diferente al predominante según los criterios de la Taxonomía SOLO.

Las evidencias encontradas en las UVE heurísticas muestran que los PQF no se limitaron a describir los resultados obtenidos durante la valoración potenciométrica, sino que construyeron interpretaciones fundamentadas a partir de la articulación entre la pregunta central, los conceptos científicos, los principios químicos y los registros experimentales. Esta integración evidencia la capacidad para establecer relaciones significativas entre diferentes elementos de la información con el propósito de construir explicaciones coherentes sobre el fenómeno estudiado, característica que corresponde al nivel relacional de la Taxonomía SOLO, en el cual el PQF integra diversos aspectos de una situación dentro de una estructura explicativa unificada (Biggs, 2005).

En la UVE heurística correspondiente a Coca-Cola **Figura 42**, el PQF 14 interpreto las variaciones observadas en la curva de titulación a partir de los principios de neutralización ácido-base y equilibrio químico, relacionando los cambios experimentales con la presencia de ácido fosfórico y otros componentes de la bebida. La interpretación construida permitió comprender que las diferencias entre los comportamientos teóricos y experimental se encontraban asociadas con la naturaleza química de la muestra analizada, integrando los resultados experimentales con los fundamentos conceptuales de los sistemas ácido-base. De acuerdo con Facione (2011), este tipo de interpretación evidenció la capacidad de atribuir significado a la información disponible mediante la integración de conocimientos científicos y evidencias experimentales.

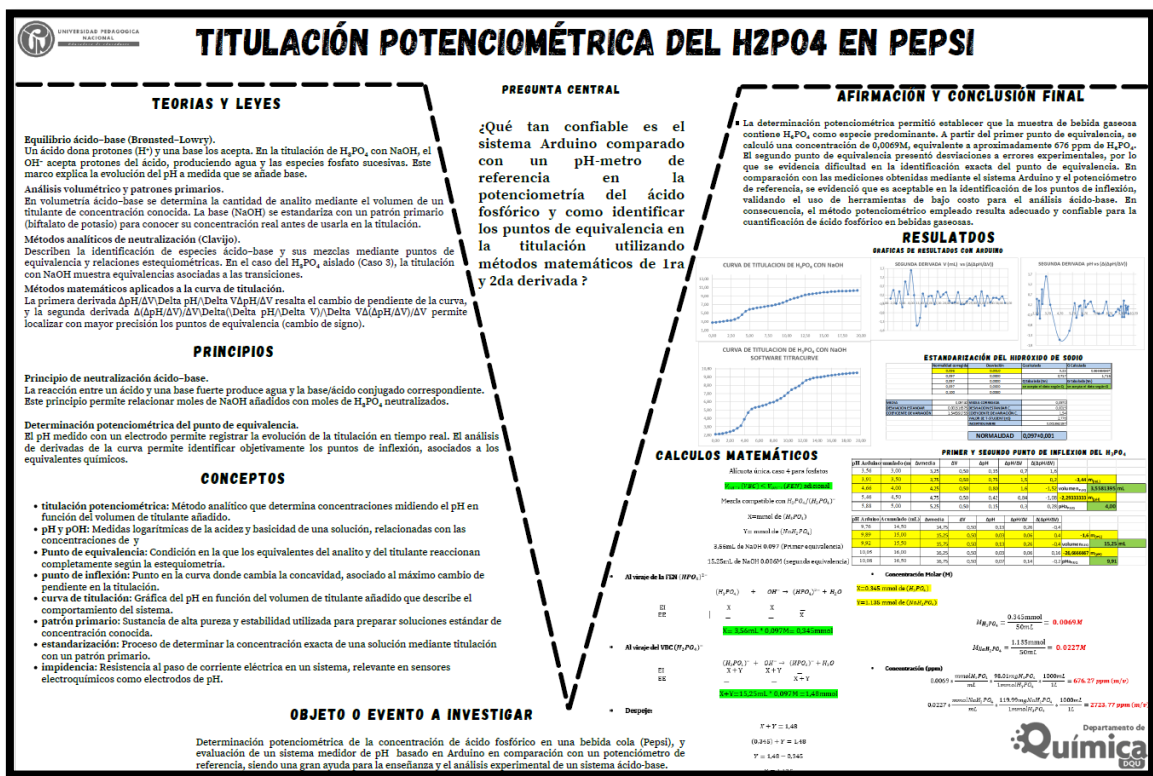
Figura 42. UVE heurística PQF 14, grupo Coca-Cola.



Nota. Autores (2026)

De igual manera, el PQF 12 integrante del grupo de la bebida cola Pepsi-Cola (Figura 43), ampliaron la interpretación al relacionar los fundamentos de la teoría Brønsted-Lowry, los procesos de neutralización y los métodos matemáticos empleados para la identificación de puntos de equivalencia con la validación de sistemas tecnológicos utilizados en el análisis químico. La pregunta de enfoque orientó la interpretación de los resultados experimentales desde una perspectiva que integró los aspectos químicos y tecnológicos involucrados en la valoración potenciométrica, permitiendo comprender el funcionamiento del sistema desarrollado durante la experiencia experimental. Esta integración de múltiples elementos conceptuales constituye una característica propia del nivel relacional, ya que las ideas dejan de presentarse de forma aislada para conformar una explicación coherente (Biggs, 2005).

Figura 43. UVE heurística PQF 12, grupo Pepsi-Cola.



Nota. Autores (2026)

En el caso del PQF 10, quien realizó el análisis de la bebida Big-Cola (**Figura 44**), la interpretación se sustentó en la relación entre la curva experimental y la curva teórica, explicado las diferencias observadas mediante la presencia de especies reguladoras, sales fosfatadas y la distribución de especies químicas presentes en la muestra. De esta manera, integró los resultados experimentales con los principios del equilibrio químico para construir una explicación coherente del comportamiento potenciométrico de la bebida analizada. Según Facione (2011), este proceso refleja la capacidad de interpretar el significado de los datos experimentales mediante la articulación de conceptos científicos que permiten comprender una situación específica.

Diagrama UVE de ovinos Determinación Potenciométrica de Ácido Fósfórico en Bebidas Carbonatadas (Big-Cola) y Análisis de la Distribución de sus Especies Químicas

HIPÓTESIS: Si el análisis de la Big-Cola mediante titulación potenciométrica permitirá transformar los datos de pH y volumen en curvas de derivadas, logrando identificar con precisión los puntos donde el ácido fósfórico cambia de especie química alpha para así calcular su concentración real en la muestra, entonces logrando identificar los puntos de inflexión donde ocurren las transiciones entre las especies fosforadas podremos determinar el caso y las especies involucradas dentro de esta bebida comercial.

PARTE CONCEPTUAL

- Teoría:**
 - Teoría Ácido-Base de Brønsted-Lowry:** Define a un ácido como un donador de protones y a una base como un receptor de protones. En la práctica, explica cómo el ácido fósfórico cede sus protones al ion bicarbonato del NaHCO₃ de forma sucesiva. En la práctica, explica cómo el ion bicarbonato determina cuál especie de la transición prevalece en cada punto (Kirk-Othmer, 2017).
 - Teoría del Equilibrio Químico en Ácidos Poliprotónicos:** Establece que los ácidos con múltiples protones se disocian en etapas individuales, cada una con su propia constante de acidez. Esta teoría fundamenta la existencia de los dos puntos de equivalencia observados en el gráfico, donde cada paso de pH representa la neutralización de un protón específico (Frost et al., 2014).

- Legenda:**
 - Lea de Acción de Masas (Guldberg-Waage):** Establece que para una reacción en equilibrio, la relación entre las concentraciones de reactivos y productos es constante a una temperatura dada. Esta ley permite calcular las fracciones de distribución (delta) para el sistema de ácidos, prediciendo qué porcentaje de ácido fósfórico o fosfato está en la Big-Cola según el pH medido (Parrin, 2016).
 - Lea de Conservación de la Materia (Lavoisier):** Establece que la masa no se crea ni se destruye en una reacción química. En la titulación, garantiza que el número de moles de ácido inicialmente presentes en los 50 mL de Big-Cola es igual a los moles de hidróxido de sodio añadidos en el punto de equivalencia, permitiendo el cálculo preciso de la molaridad y las partes por millón (Chang, 2019).

- Principio:**
 - Criterio de la Primera Derivada en Potenciometría:** principio matemático que indica que el punto de máxima pendiente de una curva sigmoidal corresponde al punto de inflexión o equivalencia química. Este principio es la base del tratamiento de datos en Excel para calcular con exactitud los volúmenes de 8.00 mL y 17.16 mL (Christan, 2013).
 - Principio de Capacidad Amortiguadora (Buffering):** Establece que en las zonas donde el pH se cambia al añadir una gota, el sistema resiste cambios bruscos de pH. Esto explica las "mesetas" o zonas planas que se observan en la gráfica entre los picos de las derivadas, donde coexisten especies como el fosfato diácido y el fosfato monoácido (Rubinson, 2014).

- Conceptos Clave:**
 - Titulación Potenciométrica Automatizada:** Técnica de medición de pH mediante una interfaz Arduino que permite la captura de datos en tiempo real con mayor resolución y precisión que los métodos manuales.
 - Derivadas Matemáticas:** Tratamiento de datos (Excel/Python) que transforma la curva de titulación en picos matemáticos para localizar con exactitud los volúmenes de equivalencia.
 - Especies Fosforadas:** Diferentes formas químicas del ácido fósfórico cuya abundancia varía según el pH medido, generando los puntos de inflexión característicos en el gráfico.
 - Análisis en Excel:** Sucesión algebraica de uso de Excel (Ácido Fósfórico) (Inmersa en una muestra comercial (Big-Cola) que requiere tratamiento previo, como la desgasificación, para evitar interferencias en la medición).
 - Capacidad Amortiguadora:** Propiedad de una solución donde combinan un ácido débil y su base conjugada, permitiendo que el pH de la Big-Cola se mantenga relativamente estable entre los dos puntos de equivalencia.

¿PREGUNTA?

¿De qué manera el análisis de las curvas de derivadas permite identificar la transición de las especies fosforadas y determinar la concentración exacta de ácido fósfórico en una muestra comercial de Big-Cola?

- La caracterización de la Big-Cola mediante la Interfaz Arduino permitió la captura de 90 datos de alta resolución, superando la precisión de los métodos convencionales. A través del análisis de las derivadas en Excel, se determinó una concentración de 0.0174 M y 1.785 g/L ppm de ácido fósfórico, resultados que están en línea con los análisis en la mesa a los 8.00 mL y 17.16 mL.
- Debido a la identificación de los puntos de inflexión en el gráfico, el pH 5.00, se evidencia la transición entre las especies fosforadas y se confirma la eficacia del método automatizado para la cuantificación exacta de analitos en matrices comerciales complejas.

- Avances de conocimiento:**
 - Captura y Naturalización de Datos:** Registro de 90 puntos de pH mediante Interfaz Arduino, empleando el volumen de hidróxido de sodio como variable independiente para obtener una curva de alta resolución y automatizada.
 - Tratamiento Matemático:** Transformación de registros en Excel mediante el cálculo de la primera derivada, localizando con precisión los puntos de inflexión de la mesa a los 8.00 mL y 17.16 mL.
 - Clasificación:** Determinación de 0.0174 M y 1.785 g/L ppm de ácido fósfórico, resultados que confirman el equiparamiento del Caso (mesa de ácido fósfórico y Fosfato diácido según la metodología de referencia).

Volúmenes	Concentración	Concentración	Concentración	Concentración
Punto 1: Meseta 1	8.0	0.0174	1.785	1.785
Punto 2: Meseta 2	17.16	0.0174	1.785	1.785
Punto 3: Meseta 3	17.16	0.0174	1.785	1.785

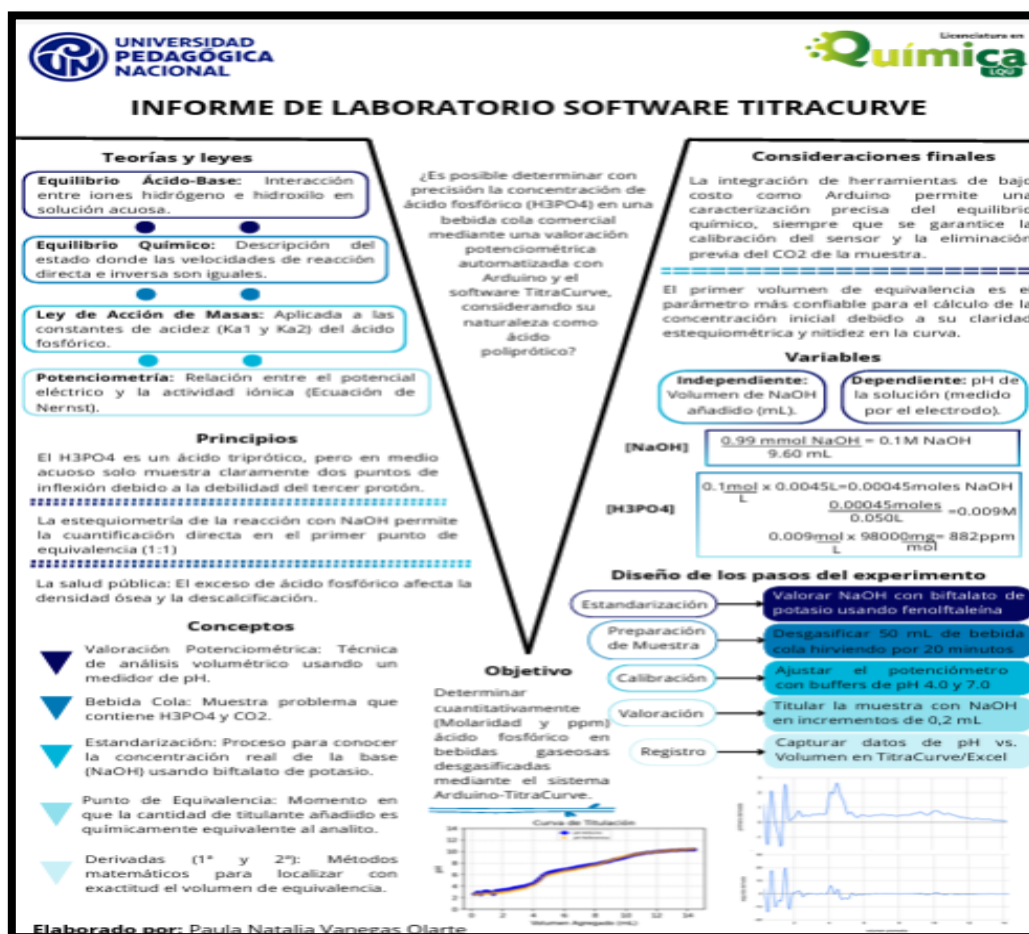
Diseño:
Integrar y preparar la muestra mediante desgasificación, la calibración de sensores de pH y la titulación potenciométrica automatizada. Esto fue lo que se realizó para la obtención de datos en tiempo real y su procesamiento en Excel, permitiendo la localización exacta de los puntos de equivalencia y la cuantificación de las especies en equilibrio presentes en la Big-Cola.

ACONTECIMIENTO

Validación de un sistema de adquisición de datos mediante la Interfaz Arduino para la monitorización potenciométrica en tiempo real. El estudio se centra en la capacidad de este dispositivo para capturar señales con una resolución superior al método convencional, así como de su tratamiento matemático en Excel (identificar con precisión las tendencias de las especies (Case), definir la subjetividad analítica de los indicadores químicos en matrices comerciales complejas).

De manera similar, en la UVE heurística de Pow-Cola **Figura 45**, el PQF 6 interpretó el comportamiento de la curva potenciométrica considerando la influencia de diferentes especies químicas presentes en la muestra y su efecto sobre los procesos de neutralización. Las explicaciones construidas permitieron relacionar los resultados obtenidos de los equilibrios ácido-base, distribución de especies y comportamiento de sistemas amortiguadores, evidenciando una integración de los conceptos químicos necesarios para comprender el fenómeno estudiado. Esta capacidad para establecer relaciones entre diferentes componentes del conocimiento constituye una evidencia del nivel relacional descrito por Biggs (2005).

Figura 45. UVE heurística PQF 6, grupo Pow-Cola.



Nota. Autores (2026)

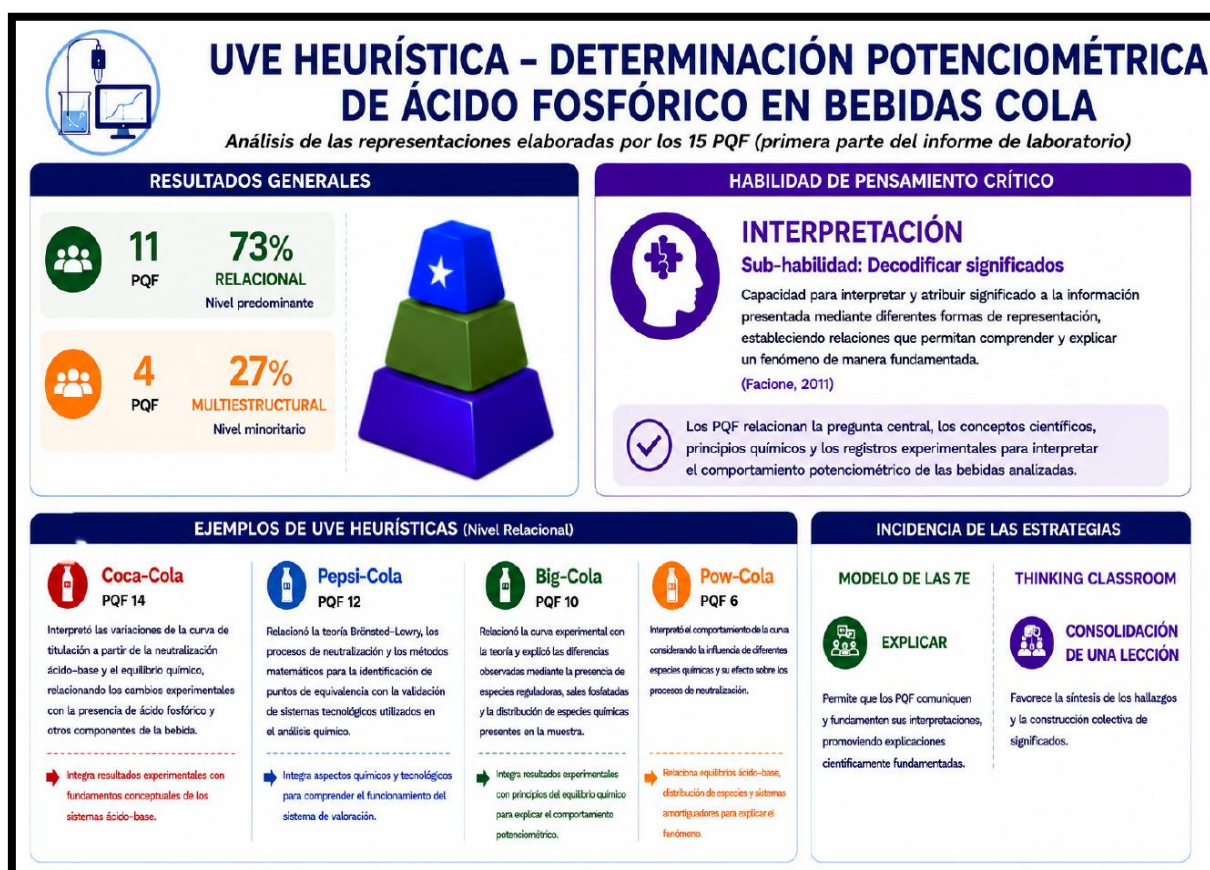
Un aspecto común en las cuatro UVE heurísticas fue la influencia del Software TitraCurve como mediador en la construcción de significados. El software permitió transformar los registros experimentales obtenidos durante la valoración potenciométrica en representaciones gráficas que facilitaron la identificación de tendencias, cambios de pendiente y puntos de equivalencia. Estas representaciones favorecieron la interpretación de los procesos químicos involucrados en la neutralización del ácido fosfórico y permitieron establecer conexiones entre los niveles macroscópico, simbólico del conocimiento químico, favoreciendo una comprensión integrada del fenómeno, tal como plantea Facione (2011) al definir la interpretación como la atribución de significado a la información obtenida a partir de diversas formas de representación.

Desde la perspectiva didáctica, la estrategia Explicar de las estrategias de las 7E promovió que los PQF comunicaran y justificaran las relaciones establecidas entre los resultados experimentales y los fundamentos teóricos que explicaban el comportamiento de las muestras analizadas, fortaleciendo la construcción de interpretaciones fundamentadas (Eisenkraft, 2003). De igual manera, la estrategia Consolidación de una lección, propuesta por el modelo integrado Thinking Classroom, favoreció la reorganización y síntesis del conocimiento construido durante la experiencia

experimental. A través de esta estrategia, los PQF integraron conceptos, principios, registros experimentales y representaciones gráficas en explicaciones coherentes sobre el comportamiento de los sistemas potenciométricos, evidenciando las características propias del nivel relacional de la Taxonomía SOLO.

Desde la perspectiva de la pirámide de alcance **Figura 46**, las evidencias obtenidas en las UVE heurísticas permiten afirmar que los PQF alcanzaron un nivel de complejidad correspondiente al nivel relacional de la Taxonomía SOLO en la sub-habilidad de decodificación de significados. Esto se debe a que las interpretaciones construidas no se limitaron a comprender los resultados experimentales transferibles, establecer generalizaciones hacia otros contextos científicos, tecnológicos y educativos. Por lo tanto, las interacciones entre la UVE heurística, las estrategias Explicar y Consolidación de una lección, el desarrollo analítico del Software TitraCurve favoreció el desarrollo de procesos interpretativos de alta complejidad, característicos del nivel abstracto ampliado.

Figura 46. Pirámide de alcance habilidad de interpretación, Actividad # 3.



Nota. Autores (2026)

Habilidad de pensamiento: Análisis de problemas.

En la habilidad de pensamiento crítico análisis, específicamente en la sub-habilidad examinar ideas, los resultados obtenidos a partir de las UVE heurísticas elaboradas por los PQF durante el informe de laboratorio (**Anexo 4**) evidencian que, de los 15 PQF, 14 fueron clasificados en el nivel relacional de la Taxonomía SOLO, mientras que 1 se ubicó en el nivel multiestructural. Estos resultados muestran un claro predominio del nivel relacional, lo que evidencia un nivel de complejidad caracterizado por la integración de conceptos, procedimientos, evidencias experimentales y fundamentos teóricos para examinar las ideas involucradas en la construcción del conocimiento científico, estableciendo relaciones coherentes entre los diferentes componentes de la UVE heurística, característica propia de este nivel según Biggs (2005). En consecuencia, el análisis que se presenta a continuación se centra en las UVE heurísticas correspondientes a los PQF clasificados en el nivel relacional, dado que constituyen la tendencia predominante del grupo y permiten caracterizar la manifestación de la sub-habilidad examinar ideas, entendida como la capacidad para identificar, analizar y relacionar conceptos, afirmaciones y explicaciones con el fin de comprender cómo se articulan dentro de un razonamiento científico (Facione, 2011). Aunque la UVE heurística clasificada en el nivel multiestructural fue considerada durante el proceso de categorización, esta no constituye el eje central de la interpretación, ya que corresponde a un nivel de complejidad diferente al predominante según los criterios de la Taxonomía SOLO.

En la UVE heurística correspondiente a Coca-Cola (**Figura 42**), el PQF 14 examinó las ideas al relacionar los principios de neutralización del ácido fosfórico y el equilibrio químico con la información obtenida mediante el sistema de medición implementado con Arduino y el Software TitrCurve. A partir de la curva potenciométrica, explicó que las variaciones registradas durante la titulación correspondían al consumo progresivo de protones y que estos cambios eran representados gráficamente por el sistema para determinar el comportamiento del pH. Esta integración entre conceptos químicos y tecnológicos evidencia un razonamiento característico del nivel relacional de la Taxonomía SOLO, en el cual los diferentes elementos del problema se articulan dentro de una explicación coherente (Biggs, 2005).

Por su parte el PQF 12 quien analizó la bebida Pepsi-Cola (**Figura 43**), evidencia la sub-habilidad de examinar ideas al relacionar los puntos de equivalencia identificados mediante las curvas de la primera y segunda derivada generadas por TitrCurve con los fundamentos de la valoración potenciométrica y el funcionamiento del sistema de medición basado en Arduino. PQF integró la información proporcionada por el software con los principios del equilibrio ácido-base para explicar el comportamiento de la muestra durante la titulación. De acuerdo con Facione (2011), examinar ideas implica establecer relaciones entre conceptos y explicaciones que permitan comprender un fenómeno de manera estructurada, aspecto evidenciado en esta producción.

El análisis desarrollado para la bebida Big-Cola (**Figura 44**), el PQF 10 examinó las ideas al relacionar las diferencias observadas entre la curva experimental y la curva obtenida mediante TitraCurve con la presencia de especies reguladoras, la distribución de especies fosfatadas y la respuesta del sistema de medición. La integración entre la información experimental, las representaciones gráficas y los fundamentos del equilibrio químico permitió explicar el comportamiento potenciométrico de la bebida, articulando los conceptos químicos con los recursos tecnológicos empleados durante la práctica experimental.

De manera similar, el PQF 6 durante el análisis de Pow-Cola (**Figura 45**), el examen de las ideas se manifestó mediante la relación establecida entre los registros experimentales, las curvas obtenidas con TitraCurve y los principios químicos que describen los procesos de neutralización del ácido fosfórico. El PQF explicó el comportamiento del sistema de medición integrando conceptos como potencial, pH, equilibrio ácido-base y funcionamiento del sensor potenciométrico, evidenciando la capacidad para relacionar los componentes químicos y tecnológicos involucrados en la experiencia experimental, tal como se describe en el nivel relacional de la Taxonomía SOLO (Biggs, 2005).

Un aspecto común en las cuatro UVE heurísticas fue la utilización del Software TitraCurve como recurso que favoreció el desarrollo de la sub-habilidad examinar ideas. La representación gráfica de las curvas de titulación y de sus derivadas permitió que los PQF establecieran relaciones entre las variables experimentales registradas por el sistema de medición y los principios químicos que explican el comportamiento de las soluciones ácido-base. De esta manera, el software facilitó la integración entre los datos obtenidos mediante el sensor, el procesamiento realizado por Arduino y los fundamentos de la potencimetría, fortaleciendo la comprensión del funcionamiento del sistema de medición (Facione, 2011).

Desde la perspectiva didáctica, la estrategia Explicar de las 7E favoreció que los PQF relacionaran los conceptos químicos abordados durante la práctica experimental con las herramientas tecnológicas utilizadas para la obtención y el análisis de los datos. Al comunicar sus explicaciones, integraron las representaciones gráficas, los registros experimentales y los fundamentos teóricos para comprender el funcionamiento del sistema potenciométrico, promoviendo el desarrollo de la sub-habilidad examinar ideas (Eisenkraft, 2003).

De igual manera, la estrategia Consolidación de una lección del modelo integrado Thinking Classroom permitió reorganizar y sintetizar las ideas construidas durante la práctica experimental. Conforme a Liljedahl (2021), esta estrategia favorece la consolidación de conexiones entre conceptos, procedimientos y evidencias mediante la discusión y la reflexión colectiva. En las UVE heurísticas analizadas, esta consolidación facilitó la integración entre la pregunta de enfoque, los registros experimentales, las representaciones generadas por TitraCurve, el funcionamiento del sistema basado en Arduino y los principios del equilibrio químico, evidenciando la capacidad de los PQF

para relacionar conceptos químicos y tecnológicos con el fin de explicar el sistema de medición, tal como se establece en el nivel relacional de la Taxonomía SOLO (Biggs, 2005).

En relación con la pirámide de alcance **Figura 47**, los resultados evidencian que los PQF alcanzaron la sub-habilidad examinar ideas dentro de la habilidad de análisis, puesto que construyeron explicaciones experimentales y representaciones gráficas. Esta articulación entre los componentes de la UVE heurística, fortalecida por la utilización de TitraCurve, la estrategia Explicar del modelo de las 7E y la consolidación de una lección del modelo integrado Thinking Classroom, permitió desarrollar argumentos coherentes y científicamente fundamentados, propios del nivel relacional de la Taxonomía SOLO.

Figura 47. Pirámide de alcance habilidad de análisis, Actividad # 3.



Nota. Autores (2026)

8.3.5. Prueba de salida: Aplicación Test de Halpern.

La prueba de salida tuvo como finalidad valorar el avance en las habilidades de pensamiento crítico de interpretación y análisis de problemas como resultado de la implementación de la secuencia didáctica fundamentada en las estrategias del modelo integrado Thinking Classroom y las 7E. Para ello, se empleó nuevamente el test de Halpern, correspondiente al mismo instrumento aplicado en la prueba de entrada, lo que permitió establecer una comparación entre el estado inicial y el estado final de las habilidades evaluadas. A partir de este análisis comparativo fue posible determinar el

progreso alcanzado por los PQF, tanto en los niveles de la Taxonomía SOLO como en el desarrollo de las habilidades de pensamiento crítico objeto de estudio.

Habilidad de pensamiento: Interpretación

En la prueba de salida, para la habilidad de pensamiento crítico interpretación, específicamente en la sub-habilidad categorización de la información, los resultados evidencian que, de los 15 PQF, 13 fueron clasificados en el nivel relacional de la Taxonomía SOLO, mientras que 2 se ubicaron en el nivel multiestructural. Estos resultados muestran un claro predominio del nivel relacional, lo que evidencia un nivel de complejidad caracterizado por la integración y organización de conceptos, principios y evidencias científicas dentro de una estructura explicativa coherente, característica propia de este nivel según Biggs (2005). En consecuencia, el análisis que se presenta a continuación se centró en las respuestas representativas de los PQF clasificados en el nivel relacional, dado que constituyen la tendencia predominante del grupo y permiten caracterizar la manifestación de la habilidad de pensamiento crítico interpretación, específicamente de la sub-habilidad categorización de la información, entendida como la capacidad para organizar, clasificar e interpretar la información de acuerdo con criterios conceptuales y contextuales que favorecen la construcción de explicaciones fundamentadas (Facione, 2011). Aunque las respuestas correspondientes al nivel multiestructural fueron consideradas durante el proceso de categorización, estas no constituyen el eje central de la interpretación, ya que representan una menor proporción de participantes y corresponden a un nivel de complejidad diferente al predominante según los criterios de la Taxonomía SOLO.

Una de las evidencias más representativas corresponde a la situación relacionada con las lecturas inestables del sistema medidor de pH. Ante la pregunta sobre la interpretación de las variaciones observadas, el PQF 5 respondió:

“Las variaciones observadas indican que el sistema de medición presenta algún factor que afecta la estabilidad de la señal obtenida por el sensor de pH. Aunque los cambios no son extremadamente amplios, evidencian que el valor registrado no es completamente confiable. Este comportamiento puede estar asociado a problemas instrumentales, eléctricos o experimentales que alteran la respuesta del electrodo y, por tanto, la precisión de la medición”.

Esta respuesta evidencia que el PQF 5 no se limitó a describir la fluctuación de las lecturas, sino que organizó la información en categorías conceptuales relacionadas con el origen del problema, diferenciando factores instrumentales, eléctricos experimentales. Esta clasificación le permite interpretar desde una perspectiva sistémica, reconociendo que diferentes tipos de variables pueden explicar un mismo comportamiento experimental. De acuerdo con Facione (2011), la categorización implica precisamente organizar la información en estructuras conceptuales que permitan comprender su significado y establecer relaciones entre los distintos elementos que conforman una situación. Esta organización de la información se fortaleció cuando el PQF 9 responde a la pregunta sobre las posibles causas del problema:

“Una posible causa es una conexión deficiente entre el sensor y el pin analógico del Arduino, lo que podría generar ruido eléctrico e inestabilidad en la señal. Otra posible causa es que el electrodo de pH se encuentre contaminado o descalibrado. Para comprobarlo, utilizaría soluciones buffer de referencia y compararía los valores obtenidos con los esperados”.

En esta respuesta el PQF 9 clasificó las posibles causas de la inestabilidad según su naturaleza, diferenciando problemas asociados al sistema electrónico de aquellos relacionados con el sensor. Posteriormente organiza las estrategias de comprobación de acuerdo con cada categoría identificada, estableciendo una relación lógica entre la posible causa y el procedimiento para verificarla. Esta forma de estructurar la información demuestra que interpreta el problema mediante un proceso organizado de clasificación y asociación conceptual, integrando los distintos elementos involucrados para explicar el funcionamiento del sistema de medición, rasgo característico del nivel relacional de la Taxonomía SOLO (Biggs, 2005).

Otra evidencia significativa corresponde a la situación relacionada con la calibración del sistema medidor de pH. Al interpretar los resultados obtenidos durante la calibración, el PQF 12 afirmó:

“Los resultados muestran que el sistema no está correctamente calibrado. Mientras la solución buffer de pH 4 presenta una lectura cercana al valor esperado, la solución buffer de pH 7 presenta una desviación significativa. Esto indica que el sistema reproduce adecuadamente un punto de referencia, pero no mantiene la proporcionalidad necesaria en todo rango de medición”.

La respuesta evidencia que el PQF 3 organizó la información considerando el comportamiento del sistema en distintos puntos de referencia y clasificó los resultados de acuerdo a su correspondencia respecto a los valores esperados. A partir de esta organización interpretó que el problema no corresponde respecto a los valores esperados. Estaba asociado al proceso de calibración y no al funcionamiento general del sensor, estableciendo relaciones entre la proporcionalidad de la señal eléctrica, la pendiente de calibración y la exactitud de las mediciones. Según Facione (2011), este tipo de razonamiento refleja la capacidad para interpretar información mediante la organización conceptual y la identificación de relaciones significativas entre los datos disponibles. La integración de estos elementos evidencia una comprensión coherente del proceso de calibración, propia del nivel relacional (Biggs, 2005).

Finalmente, la situación relacionada con la interpretación de los volúmenes de equivalencia constituye otra evidencia del fortalecimiento de esta habilidad. El PQF 5 justificó su respuesta afirmando:

“El primer volumen de equivalencia es el más apropiado porque representa la neutralización del primer protón del ácido fosfórico. En este punto existe una relación estequiométrica directa entre la cantidad de base agregada y la cantidad inicial de ácido presente en la muestra, lo que permite determinar con mayor precisión su concentración”.

En esta respuesta el PQF 5 organizó la información a partir de categorías químicas relacionadas con la neutralización, la estequiometría y los puntos de equivalencia, integrando estos conceptos para interpretar el comportamiento de la valoración ácido-base. La explicación evidencia que relacionó diferentes conceptos científicos para comprender el significado del proceso de valoración y justificar la selección del primer punto de equivalencia como criterio para la determinación de la concentración del analito. De acuerdo con Facione (2011), esta forma de organizar e integrar la información constituye una manifestación de la habilidad de interpretación, mientras que, desde la Taxonomía SOLO, corresponde al nivel relacional, ya que los diferentes elementos conceptuales son articulados dentro de una explicación científica coherente (Biggs, 2005).

En conjunto, estas evidencias muestran que los PQF fortalecieron la habilidad de interpretación mediante la categorización de la información, organizando los datos experimentales en estructuras conceptuales que facilitaron la construcción de explicaciones científicas coherentes a partir de la integración de conceptos, evidencias y procedimientos experimentales, característica propia del nivel relacional de la Taxonomía SOLO (Biggs, 2005).

En relación con la pirámide de alcance **Figura 48**, se evidenció un avance en el nivel relacional correspondiente a la Taxonomía SOLO para la habilidad de interpretación, específicamente en la sub-habilidad de categorización de la información, la cual se caracterizó porque los PQF lograron organizar y clasificar la información científica a partir de criterios conceptuales pertinentes, estableciendo relaciones entre los diferentes elementos que conforman las situaciones experimentales. En este nivel, la interpretación trasciende la organización de la información dentro del contexto inmediato, permitiendo integrar conceptos, formular principios generales y transferir el conocimiento a situaciones nuevas o similares. Asimismo, los PQF son capaces de estructurar la información de manera coherente, identificar patrones comunes entre distintos fenómenos, extrapolar explicaciones fundamentadas en principios científicos y utilizar dichas categorías conceptuales para interpretar problemas en diversos contextos, evidenciando una comprensión profunda del significado de la información y un desarrollo significativo del pensamiento crítico, en concordancia con lo planteado por Facione (2011) para la habilidad de interpretación y por Biggs (2005) para el nivel relacional de la Taxonomía SOLO.

Figura 48. Pirámide de alcance habilidad de interpretación, Prueba de salida.



Nota. Autores (2026)

Habilidad de pensamiento: Análisis de problemas

En la prueba de salida, para la habilidad de pensamiento crítico análisis, específicamente en la sub-habilidad identificar argumentos, los resultados evidencian que, de los 15 PQF, 14 fueron clasificados en el nivel relacional de la Taxonomía SOLO, mientras que 1 se ubicó en el nivel multiestructural. Estos resultados muestran un claro predominio del nivel relacional, lo que evidencia un nivel de complejidad caracterizado por la integración de afirmaciones, evidencias, razones y conclusiones para construir argumentos científicos coherentes y fundamentados, característica propia de este nivel según Biggs (2005). En consecuencia, el análisis que se presenta a continuación se centró en las respuestas representativas de los PQF clasificados en el nivel relacional, dado que constituyen la tendencia predominante del grupo y permiten caracterizar la manifestación de la habilidad de pensamiento crítico análisis, específicamente de la sub-habilidad identificar argumentos, entendida como la capacidad para reconocer las premisas, las conclusiones y las evidencias que sustentan una explicación, identificando las relaciones lógicas que estructuran un argumento (Facione, 2011). Aunque la respuesta correspondiente al nivel multiestructural fue considerada durante el proceso de categorización, esta no constituye el eje central de la interpretación, ya que corresponde a un nivel de complejidad diferente al predominante según los criterios de la Taxonomía SOLO.

Una de las evidencias más representativas corresponde a la situación en la que se solicita justificar la importancia de la alta impedancia del sistema de medición. El PQF 11 respondió:

“El PQF 11 asume que el hecho de que el sistema muestre automáticamente un valor de pH garantiza la exactitud de la medición. Su argumento se basa en la idea de que la automatización reemplaza la necesidad de calibración. Sin embargo, esta conclusión no considera que el sensor requiere puntos de referencia para asegurar que las lecturas correspondan a valores reales de pH”.

Esta respuesta evidencia que el PQF mostró la idea central que origina el problema, reconoció el error conceptual presente en el razonamiento del PQF 11 y establece la relación entre la calibración del electrodo y la confiabilidad de la medición. De esta manera, el PQF 11 no solo describió el problema, sino que analizó la estructura del razonamiento que lo sustenta y explica por qué la conclusión obtenida carece de respaldo científico. De acuerdo con Facione (2011), este tipo de respuestas refleja la habilidad de análisis, ya que el sujeto identifica las relaciones entre las afirmaciones, reconoce las evidencias disponibles y examina como estas sustentan o contradicen una conclusión. Cuando se plantea la forma de abordar dicho error conceptual, el PQF 11 responde:

“Formularias preguntas orientadoras acerca de cómo el sensor transforma la señal eléctrica en valores de pH y qué ocurriría si el electrodo presentara desviaciones. De esta manera podría analizar críticamente las limitaciones del instrumento y reconocer la importancia de la calibración para obtener resultados confiables”.

En esta respuesta el PQF 11 identificó una estrategia de solución coherente con la naturaleza del problema. Las preguntas orientadas permitieron que el PQF 11 examinara las causas de su error, contraste sus ideas con el funcionamiento real del sistema potenciométrico y reconstruya su comprensión a partir de la evidencia experimental. Este razonamiento evidencia un proceso de análisis en el que la solución propuesta responde directamente a las causas identificadas, aspecto que Facione (2011) considera característico de las personas que desarrollan pensamiento crítico al analizar problemas complejos. Asimismo, al justificar que la mejor alternativa consistió en guiar al estudiante mediante preguntas el PQF 6 afirma:

“Esta estrategia permitió que examine las bases de su razonamiento, contraste sus ideas con la evidencia experimental y construya una comprensión más sólida del funcionamiento del sistema de medición”.

La respuesta evidenció que el PQF 6 comprendió que la solución del problema requiere promover procesos de reflexión y análisis sobre las propias ideas, que favoreció la revisión crítica de sus explicaciones antes de aceptar una conclusión. Según Facione (2011), este tipo de razonamientos demuestra la capacidad para analizar la información disponible y seleccionar estrategias sustentadas en evidencias.

Otro ejemplo significativo corresponde a la situación relacionada con el funcionamiento del sistema potenciométrico. Al analizar el razonamiento del estudiante, uno el PQF 9 expresa:

“Considero que el sensor entrega una lectura, entonces las condiciones técnicas del sistema son irrelevantes. En este sentido, se ignora la función de la alta impedancia en la conservación de la señal eléctrica generada por el electrodo. Existe una desconexión entre el principio físico del sensor y la interpretación que realiza sobre su funcionamiento”.

Esta respuesta evidenció que el PQF identificó los elementos que originan el problema y reconoce la relación existente entre las características eléctricas del sistema y la confiabilidad de las mediciones. Del mismo modo, cuando explica que la alta impedancia evita la pérdida de la señal eléctrica y que una impedancia inadecuada genera mediciones inestables, demuestra que comprende cómo interactúan las diferentes variables involucradas en la situación experimental. Este tipo de razonamiento coincide con lo planteado por Facione (2011), quien señala que la habilidad de análisis de problemas implica reconocer la conexiones entre los distintos componentes de un problema para comprender su funcionamiento y explicar las causas que producen un determinado resultado.

La situación correspondiente a la selección de indicadores ácido-base constituyen otra evidencia del fortalecimiento de esta habilidad. El PQF 4 justificó su respuesta afirmando:

“El azul de bromotimol es el indicador más apropiado para el primer punto de equivalencia porque su intervalo de transición se encuentra próximo al pH característico de esta etapa de neutralización. Para el segundo punto de equivalencia, la fenolftaleína resulta más adecuada debido a que cambia de color en un intervalo de pH más básico, coherente con las condiciones químicas presentes en esa fase de la valoración. La selección de ambos indicadores se fundamenta en la relación entre sus intervalos de viraje y los cambios de pH en cada punto de equivalencia”.

En esta respuesta el PQF analizó simultáneamente diversas variables del problema, como el comportamiento químico de los indicadores, los intervalos de transición y los cambios de pH presentes durante la valoración. La explicación integra estos elementos para justificar la selección de los indicadores, demostrando que el participante comprende las relaciones existentes entre ellos y fundamenta su decisión mediante principios científicos. Según Facione (2011), este tipo de respuestas evidencia la capacidad para analizar problemas complejos considerando múltiples factores antes de emitir una conclusión.

Por lo tanto, en la pirámide de alcance **Figura 49**, se evidenció un avance en el nivel relacional correspondiente a la Taxonomía SOLO para la habilidad de análisis de problemas, específicamente en la sub-habilidad de identificar argumentos, se caracteriza porque los PQF lograron reconocer los argumentos presentes en una situación

problemática y establecer relaciones coherentes entre las premisas, las evidencias y las conclusiones que los sustentan. En este nivel, el análisis trasciende la identificación aislada de los elementos del problema, permitiendo integrar los fundamentos y emitir juicios fundamentados. Asimismo, los PQF son capaces de detectar inconsistencias conceptuales, contrastar diferentes puntos de vista y justificar sus decisiones mediante explicaciones sustentadas en principios disciplinares, evidenciando una comprensión integrada del problema y un desarrollo significativo del pensamiento crítico en contextos de resolución de problemas.

Figura 49. Pirámide de alcance habilidad de análisis, Prueba de salida.



Nota. Autores (2026)

La comparación entre ambas aplicaciones del Test de Halpern evidenció una evolución progresiva en la complejidad cognitiva de las respuestas. En la prueba diagnóstica predominaban respuestas centradas en la memorización de conceptos, la identificación de información explícita y la descripción de procedimientos experimentales. Estas características corresponden principalmente a los niveles uniestructural y multiestructural de la Taxonomía SOLO, donde el conocimiento aún permanece fragmentado y las relaciones entre conceptos son limitadas.

En contraste, la prueba de salida evidencia respuestas más elaboradas, fundamentadas y argumentadas. Los PQF establecen relaciones entre principios electroquímicos, procesos experimentales y aplicaciones instrumentales; justifican científicamente sus decisiones y explican fenómenos considerando múltiples variables simultáneamente. Esta progresión muestra un tránsito desde niveles de aprendizaje

superficial hacia niveles de aprendizaje profundo, reflejado en el paso desde respuestas descriptivas hasta explicaciones propias del nivel relacional.

Los avances observados pueden explicarse por la implementación de la secuencia didáctica basada en las estrategias del modelo integrado Thinking Classroom y las 7E. Las estrategias del modelo integrado Thinking Classroom promovieron espacios donde los PQF resolvieron problemas auténticos de manera colaborativa, discutieron diferentes alternativas de solución, defendieron sus argumentos y analizaron críticamente las ideas de sus compañeros. Estas dinámicas favorecieron el desarrollo de procesos de interpretación y análisis, al exigir la construcción colectiva del conocimiento y la justificación permanente de las decisiones adoptadas.

Por su parte, las estrategias del modelo de las 7E permitieron estructurar el aprendizaje de forma progresiva mediante las etapas de Elicitar, Enganchar, Explorar, Explicar, Elaborar, Evaluar y Extender. Esta organización favoreció la recuperación de conocimientos previos, la experimentación, la construcción de explicaciones científicas y la transferencia de los conceptos hacia nuevos contextos, fortaleciendo así el aprendizaje significativo y el pensamiento crítico. La articulación de ambas estrategias generó un ambiente de aprendizaje donde los PQF participaron activamente en la resolución de situaciones experimentales relacionadas con la potenciometría y la medición de pH. Como resultado, desarrollaron una mayor capacidad para interpretar información científica, identificar argumentos, analizar evidencias y fundamentar sus decisiones mediante explicaciones coherentes.

El análisis global de la prueba de salida demuestra que la intervención didáctica favoreció la caracterización del pensamiento crítico de los PQF. Desde la perspectiva de Facione (2011), se observa un desarrollo evidente de las habilidades de interpretación y análisis, manifestado en la capacidad para comprender información científica, establecer relaciones entre conceptos, evaluar evidencias y construir argumentos sustentados.

Al comparar los resultados con la prueba diagnóstica, se evidencia un incremento en la complejidad cognitiva de las respuestas. Los PQF pasaron de respuestas predominantemente descriptivas, correspondientes a los niveles uniestructural y multiestructural, hacia respuestas integradas y fundamentadas, ubicadas principalmente en el nivel relacional de la Taxonomía SOLO (Biggs, 2005). Este cambio demuestra que los PQF no solo se apropiaron conocimientos conceptuales sobre el funcionamiento del sensor potenciométrico de pH, sino que desarrollaron la capacidad de aplicar dichos conocimientos para interpretar situaciones experimentales, analizar problemas científicos y justificar sus decisiones mediante argumentos fundamentados.

En consecuencia, los resultados permiten concluir que la integración de las estrategias del modelo integrado Thinking Classroom y las 7E constituyó una propuesta pedagógica eficaz para promover el desarrollo del pensamiento crítico en los PQF. La combinación de ambientes de aprendizaje colaborativos, resolución de problemas auténticos, discusión argumentativa y experimentación favoreció el tránsito hacia niveles superiores de complejidad cognitiva y caracterizó las habilidades de interpretación y

análisis propuestas por Facione (2011), evidenciadas en las respuestas obtenidas en la prueba de salida.

8 CONCLUSIÓN

La investigación permitió alcanzar el propósito general de fortalecer las habilidades de pensamiento crítico de interpretación y análisis de problemas en 15 profesores de química en formación (PQF) de la Universidad Pedagógica Nacional, mediante el diseño e implementación de una secuencia didáctica de actividades centrada en la técnica instrumental de la potenciometría ácido-base. La propuesta integró el modelo Thinking Classroom, las estrategias de las 7E, el software TitraCurve y un sistema medidor de pH basado en Arduino UNO. Los resultados mostraron una evolución favorable en los desempeños de los PQF, expresada en el acenso de niveles uniestructural y multiestructural hacia desempeños predominantemente relacionales de la Taxonomía SOLO. Este avance se reflejó en la capacidad para interpretar información experimental, relacionar conceptos y variables químicas, examinar situaciones problemáticas, fundamentar explicaciones y sustentar conclusiones a partir de evidencias químicas experimentales. En consecuencia, la investigación dio respuesta a la pregunta planteada y permitió establecer que la propuesta desarrollada fue pertinente para el fortalecimiento de las habilidades estudiadas en el contexto de la potenciometría ácido-base.

La caracterización diagnóstica permitió establecer que los 15 PQF iniciaron el proceso con desempeños asociados principalmente a los niveles uniestructural y multiestructural de la Taxonomía SOLO. Se identificaron dificultades para relacionar conceptos químicos, interpretar información proveniente de representaciones experimentales, así como construir argumentos sustentados científicamente. Este diagnóstico constituyó el punto de partida para estructurar la secuencia didáctica. A partir de estos resultados se seleccionaron actividades orientadas hacia la interpretación de información, el establecimiento de relaciones conceptuales, experimentales y la construcción de explicaciones fundamentadas en evidencia real.

Desde la perspectiva de la Taxonomía SOLO, los resultados evidenciaron un desplazamiento desde desempeños correspondientes a los niveles uniestructural y multiestructural hacia desempeños predominantemente relacionales. Este cambio se manifestó en la capacidad de los PQF para integrar información procedente de diferentes fuentes, establecer conexiones entre variables experimentales y relacionar los resultados de las titulaciones con los fundamentos conceptuales de la potenciometría ácido-base. La progresión identificada permitió reconocer procesos cognitivos de mayor complejidad vinculados con la interpretación y el análisis de problemas, en correspondencia con la perspectiva de Facione (2011), desde la cual estas habilidades implican comprender significados, examinar información, establecer relaciones, identificar elementos relevantes y fundamentar juicios mediante el uso de evidencia.

Durante la implementación de la secuencia didáctica se evidenció una progresión en las habilidades de interpretación y análisis de problemas. En interpretación, los PQF categorizaron información, tabularon resultados e integraron diferentes representaciones

propias de la química analítica. Estas acciones les permitieron relacionar fenómenos experimentales con curvas de titulación de los equilibrios químicos ácido-base, especies químicas predominantes y principios electroquímicos asociados a la medición potenciométrica. En análisis de problemas, se observó un avance en la capacidad para identificar argumentos, examinar ideas, reconocer relaciones entre variables y justificar conclusiones a partir de la evidencia experimental. Los participantes pasaron de respuestas predominantemente descriptivas a explicaciones con mayor articulación entre los datos obtenidos, las representaciones gráficas y los fundamentos químicos contrastados con la práctica experimental.

De igual manera, la investigación aportó al campo de la didáctica de la química una propuesta metodológica que articuló componentes pedagógicos, tecnológicos y disciplinares para la enseñanza de la potenciometría ácido-base, como contenido propio de la química analítica instrumental. La utilización articulada del Test de Halpern adaptado, la Taxonomía SOLO y la pirámide de alcance permitió fortalecer el desempeño de los PQF y reconocer la progresión alcanzada en las habilidades de interpretación y análisis durante las diferentes fases de la investigación. Esta articulación proporcionó referentes para relacionar las evidencias obtenidas durante la implementación de la secuencia didáctica con los niveles de complejidad cognitiva identificados de manera individual en los PQF.

Uno de los principales aportes de esta investigación corresponde al diseño e implementación del Software TitraCurve como recurso didáctico para la enseñanza de la potenciometría ácido-base. A diferencia de una herramienta concebida únicamente para automatizar mediciones de pH, el software se consolidó como un mediador pedagógico que favoreció la construcción del conocimiento químico al integrar la adquisición de datos experimentales, su representación gráfica in situ y el análisis de los fenómenos electroquímicos involucrados en las titulaciones potenciométricas. En consecuencia, la incorporación de tecnologías de hardware y software libre no solo amplió las posibilidades experimentales dentro del aula, sino que fortaleció procesos de interpretación, análisis y toma de decisiones fundamentadas en evidencia científica.

La articulación del modelo Thinking Classroom con las estrategias de las 7E configuró un ambiente de aprendizaje caracterizado por la participación activa, la colaboración, la discusión académica y la resolución de situaciones problema. El trabajo en grupos aleatorios, el uso de superficies verticales no permanentes, la formulación de preguntas orientadoras y la construcción colectiva del conocimiento favorecieron la participación de los PQF durante las actividades. Esta organización metodológica generó oportunidades para analizar información, contrastar explicaciones, relacionar evidencias con fundamentos químicos y justificar conclusiones derivadas de las experiencias potenciométricas.

En síntesis, esta investigación reafirma que la formación de PQF requiere propuestas educativas que trasciendan la transmisión de conceptos netamente teóricos y promuevan el desarrollo práctico de habilidades de pensamiento crítico indispensables

para el ejercicio profesional docente. Formar profesores capaces de interpretar información científica, analizar argumentos, cuestionar evidencias y tomar decisiones fundamentadas constituye un desafío prioritario para la educación científica contemporánea. En este contexto, la propuesta desarrollada demuestra que la integración de metodologías activas con recursos tecnológicos y de programación diseñados desde las necesidades propias de la enseñanza de la química representa una alternativa pedagógica viable para fortalecer dichos procesos cognitivos. Por tanto, este trabajo no solo contribuye al conocimiento sobre la enseñanza de la potenciometría ácido-base, sino que ofrece una propuesta innovadora, transferible y susceptible de ser adaptada a otros contenidos de la química y a diferentes contextos de formación docente, consolidándose como un aporte significativo para la didáctica de las ciencias y la formación de docentes de química reflexivos, críticos y comprometidos con la transformación de su práctica educativa.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Afikah, A., Rohaeti, E., & Jumadi, J. (2024). Measuring Critical Thinking Skills in Science Learning: Students' Perception Versus Actual Performance. TEM Journal, 13(4). <https://doi.org/10.18421/tem134-61>.

Ágreda, B. J. (2024). Introducción a la electroquímica analítica. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Recuperado de: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/87154>.

Aldana, D. E. (2016). Desarrollo de un prototipo de robot medidor de pH en suelos llanos. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12209/2016>.

Arellano, D. S. M., Hurtado, C. J. L., Ruelas, A. A., & Tristán, F. F. E. (2022). Automatización de una valoración volumétrica ácido-base como prototipo educativo. Educación química, 33(3), 9-20. Epub 14 de abril de 2023. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2022.3.81328>.

Beltrán, S. V. (2023). Fortalecimiento de la habilidad argumentativa, mediante la implementación del modelo integrado del thinking classroom y las 7e, en torno a la enseñanza del concepto gas. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12209/19311>.

Bezanilla, M.J., Poblete, M., Fernández, D., Arranz, S. & Campo, L. (2018). El pensamiento crítico desde la perspectiva de los docentes universitarios. Estudios Pedagógicos XLIV, 44(1), 89-113. <https://www.scielo.cl/pdf/estped/v44n1/0718-0705-estped-44-01-00089.pdf>

Biggs, J. (2005). Calidad del aprendizaje universitario. Trad. Pablo Manzano. Madrid: Narcea.

Camargo, K., Corredor, D., González, L., Marín, M., Méndez, D., Muñoz, A., Perdomo, A., Sánchez, D., Sánchez, L., & Urrea, M. (s.f.). Fabricación y evaluación de un electrodo para medir pH usando sistema Arduino. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

Castillo, E., & Vásquez, M. L. (2003). El rigor metodológico en la investigación cualitativa. Colombia médica, 34(3), 164-167. <https://www.redalyc.org/pdf/283/28334309.pdf>

Clavijo, A. (2002) Fundamentos de Química Analítica. Universidad Nacional de Colombia.

Corwin. Seery, M. K. (2020). Establishing the laboratory as the place to learn how to do chemistry. Journal of Chemical Education, 97(6), 1511–1514. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00185>

Dewi, RK, Rahayu, S., Muntholib, M. y Sumarni, W. (2025). Critical thinking skills of prospective chemistry teachers in chemistry learning whit Ethno-Socio-Scientific issues integrated inquiry. *Eclética Química* , 50 .

Downey, A. B. (2015). Think Python: How to Think Like a Computer Scientist (2nd ed.). O'Reilly Media.

Ennis, R. H. (1962). A concept of critical thinking. Harvard educational review.

Ennis, R. H. (1996). Critical thinking dispositions: Their nature and assessability. Informal logic, 18(2).

Facione, P. (1998). Critical thinking. L Leader Sh Ip, 104.

Facione, P. A. (1990). Executive Summary “The Delphi Report”, Critical Thinking: A statement of Expert Consensus for Purposes of Educational Assessment and Instruction. The California Academic Press

Facione, P. A. (2011). Critical thinking: What it is and why it counts. Insight assessment, 1(1), 1-23.

Gómez, A., & Ramirez, C. (2018). Las 7e en el proceso de enseñanza-aprendizaje de conceptos relacionados con los micro y macronutrientes. Recuperado de: <http://repository.pedagogica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12209/9270/TE-22218.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Hakim, NWA & Talib, CA (2024). Desafíos en la implementación de habilidades de pensamiento crítico en química según educadores malasio. Revista Internacional de Investigación Académica en Educación Progresiva y Desarrollo, 13(4), 2042-2051. <http://dx.doi.org/10.6007/IJARPED/v13-i4/23797>.

Halpern, D. (2006). Halpern Critical Thinking Assessment Using Everyday Situations: Background and scoring standards (2º Report). [Unpublished manuscript]. Claremont, CA: Claremont McKenna College. <https://psycnet.apa.org/doiLanding?doi=10.1037%2Ft10940-000>

Hernández, J. A. (2021). Diseño de un sistema de monitoreo de parámetros del agua en que habitan peces ornamentales para brindar las condiciones óptimas de supervivencia a las especies, basado en el uso de tecnologías de sensores de precisión y

sistemas embebidos. [Proyecto aplicado]. Repositorio Institucional UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/43157>.

Hernández, M. A. (2020). Diseño y construcción de equipos de análisis electroquímico basados la placa Arduino. Facultad de Química, UNAM. Recuperado de: <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3614165>.

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. Mc Graw Hill Education.

Hofstein, A., & Lunetta, V. N. (2004). The laboratory in science education: Foundations for the twenty-first century. Science Education, 88(1), 28–54. <https://doi.org/10.1002/sce.10106>

Ladino Ospina, Y. & Paez Muñoz, L. (2019). El pensamiento crítico y el modelo de las 7e: una estrategia de fortalecimiento del aprendizaje en el aula de clase. Recuperado de: <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/5597>.

Liljedahl, P. (2021). *Building thinking classrooms in mathematics*. Corwin: a sage publishing company.

Madruga, B. J. (2023). Diseño de un sistema de captación y motorización de los parámetros de operación de un biorreactor. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/59758>

Noreña, A. L., Alcaraz-Moreno, N., Rojas, J. G., & Rebolledo-Malpica, D. (2012).

Aplicabilidad de los criterios de rigor y éticos en la investigación cualitativa. *Aquichan*, 12(3), 263-274. [Aplicabilidad de los criterios de rigor y éticos en la investigación cualitativa \(scielo.org.co\)](https://doi.org/10.15446/aquichan.12.3.263-274)

Ocampo, T. A. (2017). Una aproximación al desarrollo de habilidades del pensamiento crítico desde el modelo de las 7E empleando laboratorios virtuales como estrategia para minimizar el impacto en la salud de los hidrocarburos aromáticos. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12209/10714>.

Paul, R. W. (1984). Critical thinking: fundamental to education for a free society. *Educational leadership*, 42(1), 4-14.

Pérez, C. V. & Pérez, G. A. (2023). Caracterización de habilidades de pensamiento crítico mediadas por la química en contexto en relación con la adsorción de Hg²⁺ sobre α -Fe₂O₃-nano soportadas en matriz biopolimérica. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12209/18830>.

Python Software Foundation. (2025). Python documentation (Version 3.13). <https://docs.python.org/3/>

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*. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00450>.

Rodríguez, C. R., Casas, M. J. A., & Martínez C. D. E. (2020). Laboratorio de química bajo contexto: insumo para el desarrollo de habilidades de pensamiento crítico. *Tecné, Episteme Y Didaxis: TED*, (47), 33–52. <https://doi.org/10.17227/ted.num47-11334>.

Skoog, D., West, D., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2014). *Fundamentos de Química Analítica* (Ed.9th). México: Cengage. Learning.

Skoog, D., West, D., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2023). *Fundamentos de Química Analítica* (Ed.10th). México: Cengage. Learning.

Soler, M. (2015). *Enfoques de enseñanza y enfoques de aprendizaje: Posibles relaciones entre sí y con el logro académico de los estudiantes en evaluaciones externas*. (Tesis doctoral). Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá, Colombia.

Vajpayee, S., Kumar, B., Thakur, R., & Kumar, M. (2017). Design and development of nano pH sensor and interfacing with arduino. *Int. J. Electron. Electr. Comput. Syst. IJEECS*, 8(6), 66-75.

Velázquez, D. E., & Valenzuela, L. G. (2024). Percepciones de estudiantes universitarios sobre las habilidades del pensamiento crítico. *Praxis Educativa*, 28(3), 1–17. <https://doi.org/10.19137/praxiseducativa-2024-280310>.

Vidal-Silva, C.L., Lineros, M. I., Uribe, G. E., & Olmos, C. J. (2019). *Electrónica para Todos con el Uso de Arduino: Experiencias Positivas en la Implementación de Soluciones Hardware-Software*. *Información tecnológica*, 30(6), 377-386. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000600377>.

Zelle, J. M. (2017). *Python Programming: An Introduction to Computer Science* (3rd ed.). Franklin, Beedle & Associates.

10 ANEXOS

Anexo 1. Instrumento 1: Prueba de entrada y de salida adaptación del test de Halpern.
<https://drive.google.com/file/d/1aNnGN8KNLSv1RyGw8HCN2wscX4bsWkaw/view?usp=sharing>

Anexo 2. Instrumento 2: Actividad # 1: Comprendiendo la potenciometría ácido-base. Guía de trabajo y producciones académicas (mapas conceptuales).
<https://drive.google.com/file/d/1R4TiuBOURQLSLVwLE5HrVDWa02-JHc8f/view?usp=sharing>

Anexo 3. Instrumento 3: Guía de uso software Tinkercad y Actividad # 2: Exploremos en Tinkercad, una aproximación del sistema medidor de pH.
<https://drive.google.com/file/d/1PNuuYTZ6FOXQnsIU8xgdeQtF5k4EzHni/view?usp=sharing>

Anexo 4. Guía de laboratorio e informe de laboratorio, formato de informe y producciones académicas (UVE Heurística): Determinación de la concentración de ácido fosfórico en bebidas cola.
<https://drive.google.com/file/d/16pxhOY3gP6e4ZvumEbyEQlZyiLiMHoPG/view?usp=sharing>

Anexo 5. Consentimiento informado.
<https://drive.google.com/file/d/1cSsDzgKgWcj1FjpH4Tdl1Os24iigup6e/view?usp=sharing>

Anexo 6. Instrumento de validación por juicios de expertos del Test de Halpern y la secuencia didáctica.
https://drive.google.com/file/d/1i2_KSpB-B8oYcimBic918yj4pZidHmLy/view?usp=sharing

Anexo 7. Manual de uso software TitraCurve.
<https://drive.google.com/file/d/1EWA5oZOnuQoPFOFJPFmF4YMv4R80gg3a/view?usp=sharing>

Anexo 8. Rubrica de validación por juicio de expertos para la evaluación del software TitraCurve basado en criterios ISO/IEC 25010.
<https://drive.google.com/file/d/1CQoCigfIndecrySrBUmpnfy6pHiSwlOD/view?usp=sharing>

Anexo 9. Resumen del montaje completo del sistema medidor de pH integrado al Software TitraCurve.
<https://drive.google.com/file/d/1Ogi2cr3PsaZXPp3YqH15CSdd7zf3aaeg/view?usp=sharing>

Anexo 10. Resumen del reporte obtenido de la determinación de ácido fosfórico en la muestra de Coca-Cola con el Software TitrCurve.

<https://drive.google.com/file/d/1zbJrEBxRcnQrorhbpCx0lCmp9ZkoYaEL/view?usp=sharing>

Anexo 11. Resumen del reporte obtenido de la determinación de ácido fosfórico en la muestra de Big-Cola con el Software TitrCurve.

<https://drive.google.com/file/d/1x-mM6fhDNm2G8x-Y5Ac92Jm6pYNByhAa/view?usp=sharing>

Anexo 12. Resumen del reporte obtenido de la determinación de ácido fosfórico en la muestra de Pepsi-Cola con el Software TitrCurve.

<https://drive.google.com/file/d/1UL6iH63lVc5OUoDSJACGfIAS5Bkqe4hB/view?usp=sharing>

Anexo 13. Resumen del reporte obtenido de la determinación de ácido fosfórico en la muestra de Pow-Cola con el Software TitrCurve.

https://drive.google.com/file/d/1sXAC_IHC8qX7hCJQW1f5Ciqwist3Kd1m/view?usp=sharing

Anexo 14. Resumen de los datos tabulados del reporte obtenido de la determinación de ácido fosfórico en la muestra de Big-Cola.

<https://drive.google.com/file/d/1fW5J5Vo1OfUHbs4ndvCP7W9f7NI0WQxJ/view?usp=sharing>

Anexo 15. Resumen de los datos tabulados del reporte obtenido de la determinación de ácido fosfórico en la muestra de Pepsi-Cola.

https://drive.google.com/file/d/1BgHIZ0ggrKGd_M7XhwGRikY-mPV_nvjO/view?usp=sharing

Anexo 16. Resumen de los datos tabulados del reporte obtenido de la determinación de ácido fosfórico en la muestra de Pow-Cola.

<https://drive.google.com/file/d/1On0L-6swFCuVvC48dPbE89BHWF63x5I/view?usp=sharing>