



**Somos calidad,
somos USC**

Simulaciones PhET para la alfabetización digital docente en instituciones rurales de Buenaventura: análisis de percepciones y diseño de una propuesta de intervención integral

Autor

Jorge Ivan Muñoz Angulo

Título por el que opta

Magister en Educación

Director

Dr. María Eufemia Freire Tigreros

**Facultad de Educación
Maestría en Educación-Virtual
Universidad Santiago de Cali
Santiago de Cali - Colombia
2026**

SIMULACIONES PHET PARA LA ALFABETIZACIÓN DIGITAL DOCENTE EN INSTITUCIONES RURALES DE BUENAVENTURA: ANÁLISIS DE PERCEPCIONES Y DISEÑO DE UNA PROPUESTA DE INTERVENCIÓN INTEGRAL

PhET Simulations for Teacher Digital Literacy in Rural Schools of Buenaventura:

Perceptions Analysis and Design of Comprehensive Proposal

Jorge Iván Muñoz Angulo

Universidad Santiago de Cali, Colombia, Cali

0009-0004-2903-8958

✉ jorge.munoz06@usc.edu.co

María Eufemia Freire Tigreros

Universidad Santiago de Cali Colombia, Cali

0000-0002-9091-1793

✉ maria.freire00@usc.edu.co

Resumen

Este estudio analizó las condiciones institucionales, percepciones y barreras para la implementación de simulaciones interactivas PhET en cuatro instituciones educativas oficiales rurales del distrito de Buenaventura, Colombia, con el objetivo de diseñar una propuesta de intervención ajustada a dicho contexto. Mediante un diseño mixto concurrente de triangulación, se aplicó un cuestionario Likert de 25 ítems a cinco coordinadores académicos y se realizaron entrevistas semiestructuradas a cuatro rectores, analizadas mediante codificación temática. Los resultados revelan una paradoja estructural: la infraestructura para la enseñanza de la química se ubica en nivel críticamente bajo ($\bar{x} = 2.36$), mientras la valoración de las simulaciones PhET ($\bar{x} = 3.52$) y la viabilidad percibida para implementarlas ($\bar{x} = 3.76$) alcanzan niveles altos. El análisis cualitativo confirma este patrón: los temas de consenso unánime incluyen tanto la valoración positiva de PhET como las barreras concretas que impiden su uso. La triangulación metodológica ratifica que la paradoja opera a nivel institucional, lo cual representa una condición favorable para la intervención dado que los directivos-docentes son actores con capacidad real de agencia. La resolución de esta paradoja exige una estrategia articulada en tres dimensiones simultáneas: implementación offline, formación docente contextualizada y alianzas intersectoriales. Los hallazgos tienen implicaciones directas para políticas educativas rurales del Pacífico colombiano y contextos latinoamericanos de similares condiciones estructurales.

Palabras clave: simulaciones PhET, educación rural, alfabetización digital docente, aceptación tecnológica

Abstract

This study analyzed the institutional conditions, perceptions, and barriers to implementing PhET interactive simulations in four rural public schools in the Buenaventura district, Colombia, with the aim of designing an intervention proposal tailored to that context. Using a concurrent triangulation mixed-methods design, a 25-item Likert questionnaire was administered to five academic coordinators, and semi-structured interviews were conducted with four school principals, analyzed through thematic coding. The results reveal a structural paradox: chemistry teaching infrastructure scored at a critically low level ($\bar{x} = 2.36$), while the valuation of PhET simulations ($\bar{x} = 3.52$) and the perceived viability of implementing them ($\bar{x} = 3.76$) reached high levels. Qualitative analysis confirms this pattern: unanimous consensus themes include both positive valuation of PhET and the concrete barriers preventing its use. Methodological triangulation confirms that the paradox operates at the institutional level, which represents a favorable condition for intervention given that school leaders are actors with real agency. Resolving this paradox requires a strategy articulated across three simultaneous dimensions: offline implementation, contextualized teacher training, and intersectoral partnerships. The findings have direct implications for rural education policy in the Colombian Pacific region and Latin American contexts with similar structural conditions.

Keywords: PhET simulations, rural education, teacher digital literacy, technology acceptance.

Introducción

La enseñanza de las ciencias experimentales, particularmente la química, constituye uno de los desafíos pedagógicos más significativos en contextos de ruralidad, donde la ausencia sistemática de laboratorios físicos equipados limita de manera sustancial el desarrollo de aprendizajes prácticos y la consolidación de competencias científicas en la población estudiantil (de Jong, Linn & Zacharia, 2013; Potkonjak et al., 2016; Rutten, van Joolingen & van der Veen, 2012; Smetana & Bell, 2012). Esta problemática, lejos de ser circunscrita a particularidades locales, constituye un fenómeno de alcance global que adquiere dimensiones particularmente críticas en regiones caracterizadas por condiciones de marginalidad histórica, donde la brecha digital se articula de manera compleja con factores socioeconómicos, geográficos e institucionales que afectan estructuralmente la calidad y equidad de la oferta educativa (Aydin, 2020; Banda & Nzabahimana, 2023; Shambare & Jita, 2025).

En el caso específico del distrito de Buenaventura, ubicado en la región Pacífica colombiana, esta problemática se manifiesta con particular agudeza. El municipio, reconocido como uno de los principales puertos marítimos del país, presenta simultáneamente condiciones de desarrollo desigual expresadas en marcadas disparidades en el acceso a recursos educativos entre su zona urbana y las numerosas comunidades rurales dispersas en su jurisdicción. La complejidad geográfica del territorio —caracterizada por cuencas hidrográficas extensas, zonas de difícil acceso terrestre y una red vial precaria— se articula con históricos déficits de inversión pública en infraestructura educativa, generando un escenario donde la enseñanza de las ciencias naturales se ve severamente limitada por la imposibilidad material de realizar prácticas experimentales sistemáticas. Según datos de la Secretaría de Educación Distrital (2024), el municipio cuenta con 127 instituciones educativas oficiales, de las cuales aproximadamente el 65% se ubican en zona rural.

Las simulaciones interactivas PhET —desarrolladas por la Universidad de Colorado Boulder con financiación de la National Science Foundation— se han consolidado internacionalmente como herramientas de particular eficacia en contextos con escasez de recursos, destacándose por su diseño basado en principios de aprendizaje activo, su accesibilidad gratuita, su disponibilidad en más de 90 idiomas y su capacidad para operar en condiciones de conectividad limitada mediante modalidad offline (Adams et al., 2008; Perkins et al., 2012; Wieman, Adams & Perkins, 2010). Investigaciones recientes han documentado efectos positivos de estas simulaciones sobre la motivación estudiantil, el rendimiento académico y la comprensión de conceptos científicos abstractos, particularmente en instituciones con recursos limitados (Banda, 2023; Dorji, 2024; Manyilizu, 2022; Moore, 2014).

El Modelo de Aceptación Tecnológica (TAM) y la Teoría Unificada de Aceptación y Uso de la Tecnología (UTAUT) constituyen los marcos teóricos que orientan la comprensión de las dinámicas que median la adopción de tecnologías educativas en contextos organizacionales (Davis, 1989; Venkatesh et al., 2003). El UTAUT postula que la intención de uso y el uso efectivo están determinados por cuatro constructos: expectativa de rendimiento, expectativa de esfuerzo, influencia social y condiciones facilitadoras. Investigaciones aplicadas al contexto educativo de países en desarrollo han confirmado que las condiciones facilitadoras constituyen el predictor más potente del uso efectivo (Šumak, Heričko & Pušnik, 2017; Tarhini, Hone & Liu, 2017), lo cual resulta particularmente relevante en contextos rurales como el investigado.

La pandemia de COVID-19 evidenció de manera contundente las debilidades sistémicas de los sistemas educativos latinoamericanos respecto al acceso y uso efectivo de la virtualidad, revelando que gran parte de las instituciones rurales no contaban con la preparación necesaria para operar en escenarios no presenciales (Aponte Rodríguez, Zambrano Tintinago & Freire Tigreros, 2021). Esta crisis sanitaria aceleró la urgencia de implementar soluciones tecnológicas sostenibles en contextos de baja conectividad, convirtiendo a los laboratorios virtuales offline en una alternativa pedagógica de relevancia estratégica.

En este marco, resulta imperativo analizar las percepciones de los directivos-docentes — rectores y coordinadores académicos—, quienes desempeñan un rol estratégico en la planeación curricular, la gestión institucional y la integración de innovaciones tecnológicas. Estos actores no solo administran los recursos disponibles, sino que definen en última instancia la viabilidad y sostenibilidad de implementar herramientas como PhET en escenarios de ruralidad. La literatura científica sobre adopción de tecnologías educativas en Colombia rural, y particularmente en el contexto del Pacífico colombiano, permanece escasa y fragmentaria, constituyendo la laguna de conocimiento que el presente estudio se propone abordar (Shambare & Jita, 2025).

La presente investigación se propone analizar sistemáticamente las condiciones institucionales, las percepciones de los actores educativos y las barreras identificadas para la implementación de simulaciones interactivas PhET en instituciones educativas rurales del distrito de Buenaventura. Las preguntas de investigación son: (1) ¿Qué condiciones tecnológicas, pedagógicas e institucionales caracterizan actualmente a las instituciones educativas rurales de Buenaventura respecto a la enseñanza de la química?; (2) ¿Cómo perciben los directivos-docentes la pertinencia, utilidad y viabilidad de las simulaciones PhET como herramientas de alfabetización digital?; y (3) ¿Qué estrategia integral puede implementarse de manera sostenible en este contexto específico?

Marco teórico

Laboratorios virtuales y simulaciones PhET en educación científica

Los Laboratorios Virtuales (LV) han emergido en las últimas dos décadas como alternativas pedagógicas de creciente relevancia, ofreciendo posibilidades de experimentación mediada por entornos digitales que pueden suplir —aunque no reemplazar completamente— las limitaciones de acceso a laboratorios físicos tradicionales (Adams et al., 2008; Moore, 2014; Potkonjak et al., 2016). La evidencia acumulada en la literatura internacional sugiere que estos entornos virtuales, cuando se implementan de manera pedagógicamente fundamentada, contribuyen significativamente al desarrollo de comprensión conceptual, al fomento de actitudes positivas hacia las ciencias y a la promoción de experiencias de aprendizaje inclusivas, particularmente en contextos caracterizados por la escasez de recursos materiales (Manyilizu, 2022; Rutten et al., 2012; Smetana & Bell, 2012).

Las simulaciones PhET se distinguen dentro del espectro de laboratorios virtuales por varios atributos de particular relevancia para contextos rurales: (a) diseño basado en principios constructivistas de aprendizaje activo y autorregulado; (b) gratuidad y acceso abierto sin barreras de licenciamiento; (c) disponibilidad en más de 90 idiomas, incluyendo español; (d) capacidad de operación offline mediante descarga local; y (e) compatibilidad con dispositivos de bajo costo, incluyendo smartphones Android/iOS (Wieman et al., 2010). Investigaciones recientes en contextos de baja conectividad, como las realizadas por Dorji (2024) en Bután y Banda y Nzabahimana (2023) en Malaui, han documentado implementaciones exitosas de PhET bajo estas condiciones, confirmando la viabilidad de la estrategia offline en territorios similares al investigado.

Elmoazen et al. (2023), en su revisión sistemática de 47 estudios sobre aprendizaje en laboratorios virtuales, identificaron que la efectividad de estos entornos está fuertemente mediada por las condiciones de implementación: disponibilidad de dispositivos adecuados, nivel de formación docente en integración pedagógica y grado de coherencia entre las simulaciones y el currículo. Zhang (2024), en una revisión de 89 estudios, confirma que el impacto positivo de los laboratorios virtuales está condicionado por factores contextuales que trascienden el diseño técnico de los simuladores, subrayando la importancia de las condiciones institucionales de adopción.

TAM y UTAUT: marcos para comprender la adopción tecnológica educativa

El Technology Acceptance Model (TAM) propuesto por Davis (1989) establece que la intención de uso de una tecnología está determinada por dos constructos: la utilidad percibida

(perceived usefulness) y la facilidad de uso percibida (perceived ease of use). La evolución del TAM hacia la UTAUT (Venkatesh et al., 2003) amplió el modelo incorporando cuatro constructos principales: (a) expectativa de rendimiento, referida a la percepción de utilidad para mejorar el desempeño laboral; (b) expectativa de esfuerzo, relativa a la facilidad percibida de uso; (c) influencia social, que captura la percepción de que personas importantes consideran que el individuo debería usar la tecnología; y (d) condiciones facilitadoras, referidas a la percepción de disponibilidad de infraestructura y soporte técnico necesarios para el uso.

Investigaciones aplicadas al contexto educativo han confirmado la relevancia de estos constructos para predecir la adopción de tecnologías por parte de docentes (Teo, 2011; Šumak & Šorgo, 2016). Šumak, Heričko y Pušnik (2017), en un metaanálisis de 62 estudios sobre aceptación de tecnologías e-learning, encontraron que la expectativa de rendimiento y las condiciones facilitadoras son los predictores más potentes de la intención de uso, con efectos especialmente pronunciados en contextos de países en desarrollo. Tarhini, Hone y Liu (2017) documentaron específicamente para estos contextos una configuración paradójica: alta expectativa de rendimiento coexistiendo con bajas condiciones facilitadoras, patrón que el presente estudio identifica como característica del territorio investigado.

Educación rural, brecha digital y equidad educativa en el Pacífico colombiano

La intersección entre ruralidad y brecha digital configura un escenario de inequidad estructural multidimensional. Shambare y Jita (2025), en su revisión sistemática de 63 estudios sobre barreras de adopción de TIC en escuelas rurales de países en desarrollo, caracterizaron este fenómeno como el resultado de décadas de subinversión en infraestructura educativa rural, identificando la falta de infraestructura física, la ausencia de conectividad confiable y la insuficiencia de programas de formación docente como los tres obstáculos más frecuentemente reportados. En el contexto colombiano, estas barreras se articulan con factores de vulnerabilidad socioeconómica específicos del territorio del Pacífico, donde las tasas de pobreza multidimensional superan significativamente los promedios nacionales y regionales.

El conectivismo (Siemens, 2005; Downes, 2012) ofrece un marco complementario para comprender las implicaciones pedagógicas de la brecha digital en contextos rurales: al fragmentar las redes de conocimiento necesarias para el aprendizaje significativo, la ausencia de conectividad no solo limita el acceso a información, sino que impide el desarrollo de las competencias digitales necesarias para la participación plena en las sociedades del conocimiento del siglo XXI. Esta perspectiva refuerza la urgencia de desarrollar estrategias de innovación pedagógica que operen en condiciones de conectividad limitada, más que esperar la resolución de brechas estructurales de largo plazo.

Objetivos de la investigación

El objetivo general consiste en analizar las condiciones institucionales, percepciones y barreras para la implementación de simulaciones PhET como estrategia de alfabetización digital en instituciones educativas rurales de Buenaventura, Colombia, y diseñar una propuesta de intervención integral ajustada a dicho contexto.

Los objetivos específicos son: (OE1) Caracterizar las condiciones actuales de infraestructura tecnológica, acceso a Tecnologías de la Información y Comunicación y, formación docente en las instituciones educativas rurales participantes, identificando las brechas más significativas respecto a condiciones óptimas para la integración de tecnología educativa; (OE2) Explorar y analizar las percepciones de directivos-docentes —rectores y coordinadores académicos— sobre la pertinencia, utilidad y viabilidad de las simulaciones PhET, identificando las barreras específicas que impiden su implementación efectiva en el contexto investigado; y (OE3) Diseñar una propuesta integral de alfabetización digital en química fundamentada en simulaciones PhET, ajustada explícitamente al contexto rural del Pacífico colombiano, que articule estrategias técnicas, pedagógicas e institucionales en respuesta a los hallazgos empíricos obtenidos.

Método

Enfoque y diseño de investigación

La presente investigación se enmarca epistemológicamente dentro del paradigma pragmático, que sustenta la investigación mixta al reconocer que tanto los datos cuantitativos como cualitativos pueden proporcionar respuestas complementarias a las preguntas de investigación planteadas (Creswell & Plano Clark, 2018; Morgan, 2014). Metodológicamente, el estudio adopta un diseño de investigación mixta concurrente con estrategia de triangulación (DITRIAC: convergent design with triangulation). Este diseño implica la recolección simultánea de datos cuantitativos y cualitativos, su análisis independiente por vía separada, y la posterior integración en la fase de interpretación mediante procedimientos de triangulación metodológica (Creswell & Plano Clark, 2018; Hernández-Sampieri & Mendoza, 2022).

El componente cuantitativo corresponde a un estudio no experimental, descriptivo y transversal, orientado a caracterizar las condiciones institucionales mediante la aplicación de un cuestionario tipo Likert. El componente cualitativo adopta un enfoque exploratorio-fenomenológico, orientado a comprender las percepciones y experiencias vividas de rectores mediante entrevistas semiestructuradas analizadas con técnicas de análisis de contenido temático (Bardin, 2011; Yin, 2018). La elección de este diseño se fundamenta en la necesidad de obtener una comprensión comprehensiva del fenómeno, aprovechando la capacidad del componente cuantitativo para establecer patrones generales y la capacidad del componente cualitativo para explorar en profundidad significados, percepciones y contextos.

Contexto, población y muestra

El estudio se desarrolló en cuatro instituciones educativas oficiales rurales del distrito de Buenaventura, seleccionadas mediante muestreo intencional por conveniencia con criterios de inclusión explícitos: (a) ubicación en zona rural con conectividad limitada o nula a internet; (b) carencia total o precariedad extrema de laboratorios de química equipados; y (c) disponibilidad del rector y coordinador académico para participar. Las instituciones fueron codificadas como IE-R1 a IE-R4 para garantizar confidencialidad.

Tabla 1 Caracterización de las instituciones educativas participantes y perfil de los informantes

Institución	Rol	Zona geográfica	Condición infraestructura	Conectividad	Instrumento
IE-R1	Coord. / Rector	Rural costera	Sin laboratorio de química	Muy baja	Cuestionario + Entrevista
IE-R2	Coord. / Rector	Rural multi-sede	Laboratorio básico incompleto	Limitada	Cuestionario + Entrevista
IE-R3	Coord. / Rector	Rural remota	Salón sin equipos	Sin conectividad	Cuestionario + Entrevista
IE-R4 (A y B)	Coords. / Rector	Rural fluvial	Aula-bodega improvisada	Inestable	Cuestionario + Entrevista

Nota. N=9 participantes directivos-docentes de cuatro instituciones educativas rurales. IE-R4 cuenta con dos coordinadores (IE-R4A e IE-R4B). La codificación IE-R garantiza confidencialidad institucional. Coord.=Coordinador académico.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Cuestionario tipo Likert. Se diseñó y aplicó un instrumento estructurado de 25 ítems distribuidos en cinco dimensiones: D1 Infraestructura para la enseñanza de la química (ítems 1–5), D2 Recursos tecnológicos institucionales (ítems 6–10), D3 Formación docente y alfabetización digital (ítems 11–15), D4 Percepción sobre el uso de simulaciones PhET (ítems 16–20) y D5 Condiciones para implementar la propuesta (ítems 21–25). Cada ítem empleó escala Likert de cinco puntos: 1=Totalmente en desacuerdo hasta 5=Totalmente de acuerdo. El instrumento fue aplicado a los cinco coordinadores académicos (N=5) durante octubre de 2025.

Entrevista semiestructurada. Se diseñó y aplicó una guía de 12 preguntas abiertas organizadas en las mismas cinco categorías temáticas del cuestionario, orientadas a explorar: (a) percepciones institucionales sobre la enseñanza de la química; (b) barreras para la implementación de innovaciones pedagógicas; (c) apoyos necesarios para integrar laboratorios virtuales; y (d) expectativas para la sostenibilidad de intervenciones digitales. Las entrevistas se realizaron a los cuatro rectores participantes (N=4) con duración promedio de 28 minutos, fueron grabadas en audio con autorización explícita y transcritas literalmente.

Tabla 2 Estructura del cuestionario Likert por dimensión, constructo teórico y resultados de validación de contenido (IVC)

Dimensión	Constructo teórico (TAM/UTAUT)	Ítems	Nº ítems	IVC Relevancia	IVC Claridad	IVC Pertinencia
D1 Infraestructura	Condiciones facilitadoras	1–5	5	0.89	0.85	0.92
D2 Acceso TIC	Condiciones facilitadoras	6–10	5	0.92	0.88	0.90
D3 Formación docente	Expectativa de esfuerzo / Influencia social	11–15	5	0.90	0.89	0.91
D4 Uso PhET	Expectativa de rendimiento	16–20	5	0.88	0.86	0.89
D5 Viabilidad	Expectativa rendimiento + Viabilidad	21–25	5	0.91	0.90	0.93

Nota. IVC=Índice de Validez de Contenido (Lawshe, 1975). N=3 expertos con formación doctoral. Umbral mínimo: 0.78. Todos los ítems superaron el umbral en las tres dimensiones evaluadas.

Procedimientos de análisis de datos

Análisis cuantitativo. Los datos del cuestionario Likert fueron procesados en SPSS versión 26 mediante análisis estadístico descriptivo (media, mediana, desviación estándar, frecuencias) por dimensión e ítem. La confiabilidad interna se evaluó mediante el coeficiente alfa de Cronbach (α) por dimensión, interpretándose según los criterios de George y Mallery (2003): $\alpha \geq 0.90$ (excelente), $\alpha \geq 0.80$ (bueno), $\alpha \geq 0.70$ (aceptable), $\alpha \geq 0.60$ (cuestionable), $\alpha < 0.60$ (pobre).

Análisis cualitativo. Las transcripciones de las entrevistas se analizaron mediante análisis de contenido temático siguiendo el procedimiento de codificación abierta, axial y selectiva (Strauss & Corbin, 1998; Friese, 2019), empleando los criterios metodológicos del software Atlas.ti. El proceso incluyó: (a) lectura exhaustiva y familiarización; (b) generación inductiva de 21 códigos iniciales; (c) agrupación en cinco categorías temáticas; (d) construcción de matrices de co-ocurrencia; y (e) elaboración de una red semántica que representa las relaciones causales identificadas.

Triangulación metodológica. La integración de ambos componentes se realizó en la fase interpretativa mediante triangulación concurrente (Creswell & Plano Clark, 2018), construyendo una matriz que contrasta hallazgos por dimensión e identifica convergencias, complementariedades y divergencias.

Resultados

La presentación de resultados sigue la estructura del diseño DITRIAC: primero los hallazgos del componente cuantitativo (cuestionario Likert, N=5), luego los del componente cualitativo (Atlas.ti, N=4), y finalmente la triangulación metodológica integradora. Esta organización preserva la independencia analítica de cada componente antes de su integración interpretativa.

Resultados cuantitativos: diagnóstico de condiciones institucionales

El análisis estadístico descriptivo de las respuestas al cuestionario Likert (N=5 coordinadores académicos) revela un perfil institucional heterogéneo que varía significativamente entre dimensiones. La Tabla 3 presenta los estadísticos descriptivos completos por dimensión,

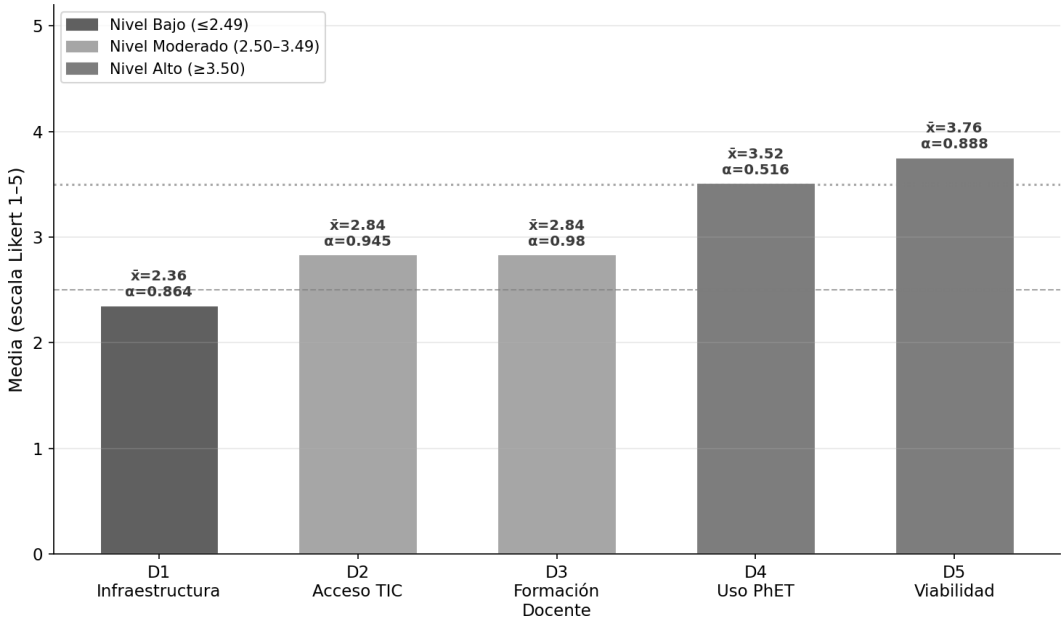
incluyendo medias, desviaciones estándar, medianas, coeficientes de confiabilidad interna e interpretación de niveles según los puntos de corte establecidos a priori.

Tabla 3 Estadísticos descriptivos por dimensión del cuestionario Likert: medias, dispersión, confiabilidad e interpretación

Dimensión	$\bar{x}$	DE	Md	α	Confiabilidad	Nivel	Constructo UTAUT
D1 Infraestructura para la enseñanza de la química	2.36	1.13	2.00	0.864	Buena	Bajo (≤ 2.49)	Condiciones facilitadoras
D2 Recursos tecnológicos institucionales (Acceso TIC)	2.84	1.23	3.00	0.945	Excelente	Moderado (2.50–3.49)	Condiciones facilitadoras
D3 Formación docente y alfabetización digital	2.84	1.07	3.00	0.980	Excelente	Moderado (2.50–3.49)	Expectativa de esfuerzo
D4 Percepción sobre el uso de simulaciones PhET	3.52	0.50	4.00	0.516	Pobre*	Alto (≥ 3.50)	Expectativa de rendimiento
D5 Condiciones para implementar la propuesta	3.76	0.78	4.00	0.888	Buena	Alto (≥ 3.50)	Expectativa rendimiento + Viabilidad
Media global del instrumento	3.06	0.94	3.00	—	—	Moderado	—

Nota. N=5 coordinadores académicos. Escala Likert: 1=Totalmente en desacuerdo, 5=Totalmente de acuerdo. α interpretado según George y Mallery (2003). *El coeficiente bajo de D4 ($\alpha=0.516$) no indica error metodológico, sino heterogeneidad conceptual: el ítem P16 (conocimiento previo de PhET, $\bar{x}=2.20$) difiere marcadamente de P17–P20 ($\bar{x}$ entre 3.60 y 4.00). $\bar{x}$ =media aritmética; DE=desviación estándar; Md=mediana.

Figura 1. Medias por dimensión del cuestionario Likert (N=5) con índices de confiabilidad interna (α de Cronbach)



Fuente: Elaboración propia con datos del cuestionario Likert (N=5) y análisis cualitativo Atlas.ti (N=4), 2025.

La Figura 1 visualiza la paradoja estructural central del estudio. La dimensión D1 (Infraestructura, $\bar{x}=2.36$) se ubica en nivel crítico bajo, señalando deficiencias graves en laboratorios de química, materiales para prácticas y espacios seguros de experimentación. Esta carencia de condiciones facilitadoras contrasta drásticamente con las dimensiones D4 (Valoración PhET, $\bar{x}=3.52$) y D5 (Viabilidad percibida, $\bar{x}=3.76$), que alcanzan niveles altos. Las dimensiones intermedias D2 (Acceso TIC, $\bar{x}=2.84$) y D3 (Formación docente, $\bar{x}=2.84$) se sitúan en niveles moderados, evidenciando heterogeneidad pero también brechas significativas respecto a condiciones óptimas. Desde el marco UTAUT, este perfil configura una alta expectativa de rendimiento (D4–D5) con insuficientes condiciones facilitadoras (D1–D3), configuración identificada por Tarhini et al. (2017) como característica de entornos educativos de países en desarrollo.

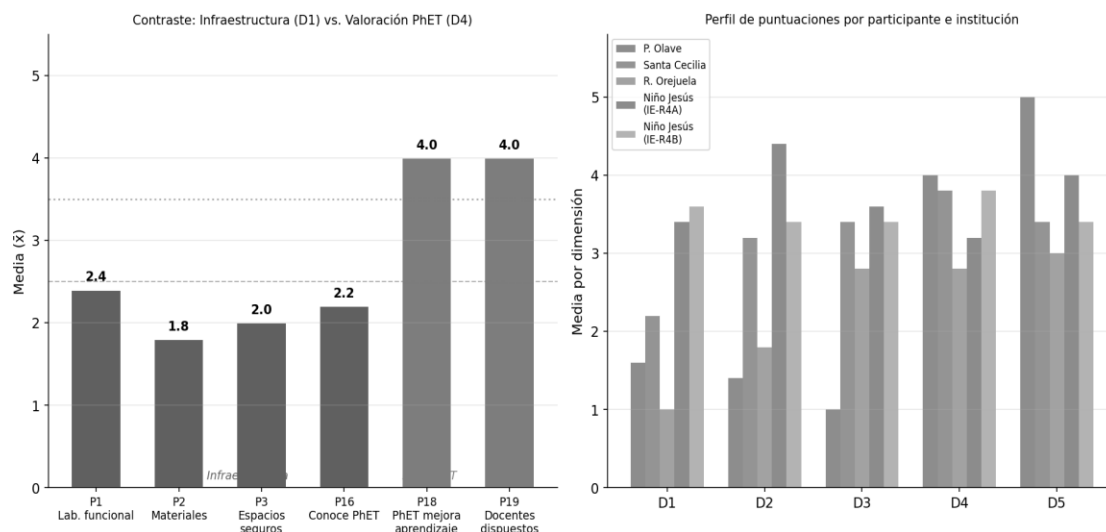
Respecto a la consistencia interna, las dimensiones D2 ($\alpha=0.945$), D3 ($\alpha=0.980$) y D5 ($\alpha=0.888$) alcanzan niveles excelentes o buenos, validando la coherencia de las respuestas. La dimensión D1 presenta confiabilidad buena ($\alpha=0.864$). El coeficiente $\alpha=0.516$ de D4 revela un hallazgo sustantivo: el ítem P16 (conocimiento previo de PhET, $\bar{x}=2.20$) difiere marcadamente de los ítems P17–P20 (pertinencia, mejora del aprendizaje, disposición docente y viabilidad: $\bar{x}$ entre 3.60 y 4.00). Esta disparidad evidencia que el desconocimiento de la plataforma coexiste con una alta valoración de su potencial, configurando una oportunidad estratégica de entrada para intervenciones de implementación.

Tabla 4 Estadísticos descriptivos por ítem: dimensiones D1 (Infraestructura) y D4 (Uso PhET)
— Contraste central del estudio

Ítem	Enunciado (resumido)	$\bar{x}$	DE	Md	Mín.	Máx.	Interpretación
D1 – Infraestructura para la enseñanza de la química $\bar{x}=2.36$ Nivel: Bajo $\alpha=0.864$							
P1	Laboratorio de química funcional y dotado	2.40	1.34	3	1	4	Bajo
P2	Materiales suficientes para prácticas experimentales	1.80	1.10	1	1	3	Bajo
P3	Espacios para actividades prácticas seguras	2.00	1.00	2	1	3	Bajo
P4	Laboratorio usado con regularidad	3.00	1.87	4	1	5	Moderado
P5	Falta infraestructura limita aprendizaje práctico	2.60	1.52	3	1	4	Moderado
D4 – Percepción sobre el uso de simulaciones PhET $\bar{x}=3.52$ Nivel: Alto $\alpha=0.516^*$							
P16	Conozco la plataforma PhET (conocimiento previo)	2.20	1.30	2	1	4	Bajo
P17	PhET es pertinente para el contexto rural	3.80	0.84	4	3	5	Alto
P18	PhET puede mejorar el aprendizaje en química	4.00	0.71	4	3	5	Alto
P19	Docentes dispuestos a incorporar PhET en clases	4.00	0.71	4	3	5	Alto
P20	Simulaciones son solución viable ante falta de lab.	3.60	0.55	4	3	4	Alto

Nota. N=5. $\bar{x}$ =media; DE=desviación estándar; Md=mediana. *El bajo alpha de D4 refleja la disparidad entre P16 (conocimiento previo, $\bar{x}=2.20$) y P17–P20 (valoración pedagógica prospectiva, $\bar{x}$ entre 3.60 y 4.00); los participantes conocen poco PhET pero valoran altamente su potencial, configurando la paradoja cuantitativa central.

Figura 2. Contraste de ítems seleccionados D1 vs. D4 (panel izquierdo) y perfil de puntuaciones por institución participante (panel derecho)

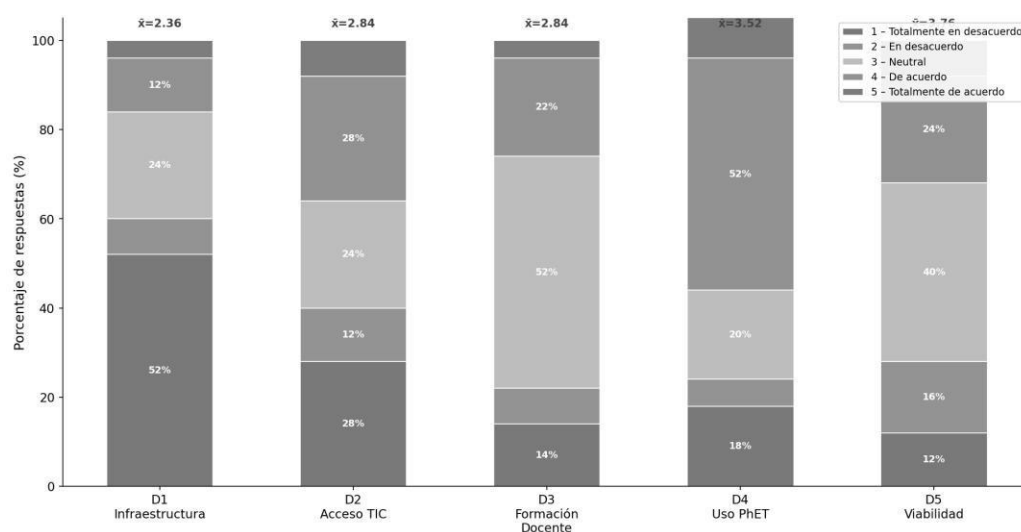


Fuente: Elaboración propia con datos del cuestionario Likert (N=5) y análisis cualitativo Atlas.ti (N=4), 2025.

La Figura 2 profundiza en dos dimensiones analíticas complementarias. El panel izquierdo ilustra el diferencial máximo entre los ítems más representativos de la paradoja: P2 (Materiales para prácticas, $\bar{x}=1.80$) registra la puntuación más baja de todo el instrumento, mientras P18 (PhET mejora el aprendizaje, $\bar{x}=4.00$) y P19 (Docentes dispuestos, $\bar{x}=4.00$) alcanzan las más altas. La brecha de 2.20 puntos entre estos extremos cuantifica la magnitud de la paradoja estructural.

El panel derecho revela la heterogeneidad institucional: P. Olave (IE-R3) registra las puntuaciones más bajas en infraestructura y acceso TIC (D1=1.0; D2=1.4), pero paradójicamente la más alta en viabilidad percibida (D5=5.0), lo que indica que la disposición institucional para innovar puede ser independiente de —o incluso reactiva a— las carencias materiales. R. Orejuela presenta el perfil más bajo en infraestructura (D1=1.0), consistente con el testimonio cualitativo de abandono institucional severo. Niño Jesús (promedio de IE-R4A e IE-R4B) muestra el perfil más equilibrado, coherente con su experiencia previa con PhET documentada en el análisis cualitativo.

Figura 3. Distribución porcentual de respuestas por categoría Likert en las cinco dimensiones del instrumento (N=5)



Fuente: Elaboración propia con datos del cuestionario Likert (N=5) y análisis cualitativo Atlas.ti (N=4), 2025

La Figura 3 complementa los estadísticos descriptivos mostrando la distribución completa de respuestas por categoría Likert para cada dimensión. Se observa que D1 (Infraestructura) concentra la mayor proporción de respuestas en las categorías 1 y 2 ("Totalmente en desacuerdo" y "En desacuerdo"), con aproximadamente el 60% de las respuestas ubicadas en el nivel de desacuerdo. En contraste, D4 y D5 muestran una polarización hacia las categorías 4 y 5, con más del 70% de respuestas en niveles de acuerdo. Esta distribución asimétrica confirma la bifurcación entre las dimensiones de diagnóstico (D1–D3) y las dimensiones de receptividad hacia la innovación (D4–D5), reforzando la validez del hallazgo central del estudio.

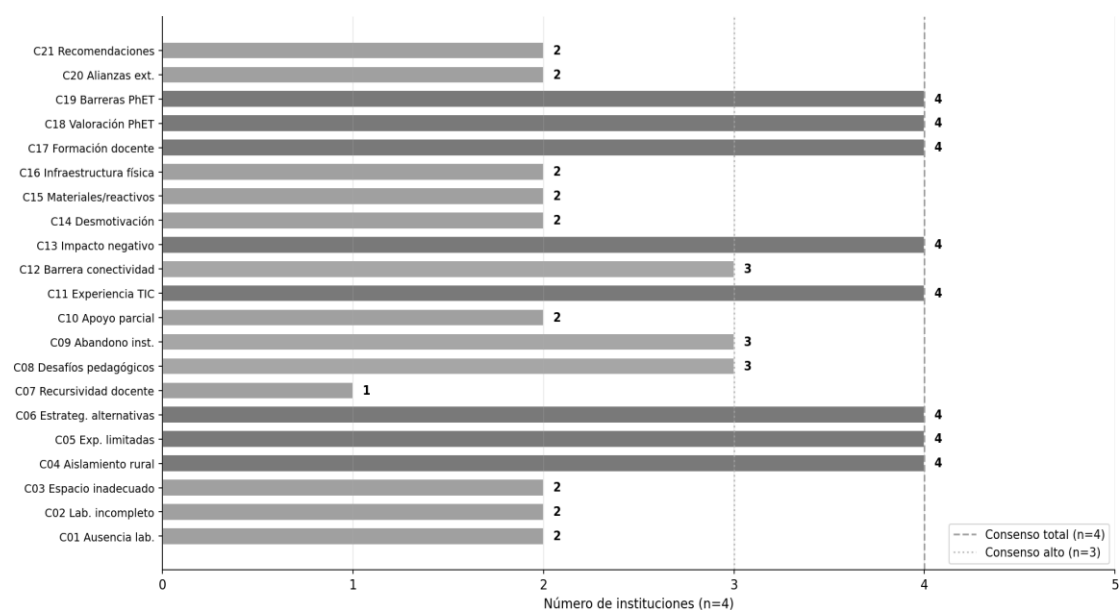
El análisis de contenido temático de las cuatro entrevistas semiestructuradas generó un sistema de codificación compuesto por 21 códigos organizados en cinco categorías analíticas. La Tabla 5 presenta el sistema completo con frecuencias de aparición por institución, siguiendo los criterios de codificación estilo Atlas.ti (Friesse, 2019).

Cód.	Nombre del código	Categoría	IE-R1 (SC)	IE-R2 (NJ)	IE-R3 (PO)	IE-R4 (RO)	n
C1 – Contexto Institucional: condiciones físicas y geográficas							
C01	Ausencia total de laboratorio	C1	✓	—	✓	—	2
C02	Laboratorio incompleto o inadecuado	C1	—	✓	—	✓	2
C03	Espacio físico inadecuado	C1	—	—	✓	✓	2
C04	Ubicación rural / aislamiento geográfico	C1	✓	✓	✓	✓	4★
C2 – Experiencia y Percepción Pedagógica: estrategias en contexto de precariedad							
C05	Oportunidades experimentales muy limitadas	C2	✓	✓	✓	✓	4★
C06	Estrategias pedagógicas alternativas	C2	✓	✓	✓	✓	4★
C07	Recursividad docente (creatividad individual)	C2	—	—	✓	—	1
C08	Desafíos pedagógicos y de seguridad	C2	✓	—	✓	✓	3
C3 – Recursos Alternativos y Acceso a TIC: apoyos y brechas institucionales							
C09	Abandono institucional / apoyo nulo	C3	✓	—	✓	✓	3
C10	Apoyo institucional parcial	C3	—	✓	—	✓	2
C11	Experiencia con TIC y simulaciones	C3	✓	✓	✓	✓	4★
C12	Barrera de conectividad	C3	✓	—	✓	✓	3
C4 – Impacto y Necesidades: consecuencias y requerimientos identificados							
C13	Impacto negativo en aprendizaje	C4	✓	✓	✓	✓	4★
C14	Desmotivación estudiantil	C4	✓	—	—	✓	2
C15	Necesidad de materiales y reactivos	C4	✓	—	—	✓	2
C16	Necesidad de infraestructura física	C4	✓	—	✓	—	2
C17	Necesidad de formación docente especializada	C4	✓	✓	✓	✓	4★
C5 – Perspectiva Estratégica: valoración de PhET y condiciones para implementación							

C18	Valoración positiva de PhET	C5	✓	✓	✓	✓	4 ★
C19	Barreras para implementar PhET	C5	✓	✓	✓	✓	4 ★
C20	Necesidad de alianzas externas	C5	—	—	✓	✓	2
C21	Recomendaciones sistémicas (PEI/políticas)	C5	✓	—	—	✓	2

Nota. IE-R1=Santa Cecilia (SC); IE-R2=Niño Jesús de Praga (NJ); IE-R3=Patricio Olave (PO); IE-R4=Raúl Orejuela (RO). ✓=código presente; —=ausente. ★=Código de consenso transversal (n=4): presente en las cuatro instituciones. Análisis basado en N=4 entrevistas transcritas literalmente y procesadas con codificación temática (Bardin, 2011; Frieze, 2019).

Figura 4. Frecuencia de aparición de los 21 códigos cualitativos por número de instituciones — Análisis Atlas.ti (N=4)



Fuente: Elaboración propia con datos del cuestionario Likert (N=5) y análisis cualitativo Atlas.ti (N=4), 2025.

La Figura 4 revela la arquitectura de consenso del análisis cualitativo. Se identifican ocho códigos de consenso transversal (barra roja, n=4): C04, C05, C06, C11, C13, C17, C18 y C19. La unanimidad de estos ocho códigos constituye el hallazgo cualitativo más robusto del estudio: confirma que las condiciones de precariedad y las percepciones sobre PhET no son atributos particulares de instituciones específicas, sino rasgos estructurales del sistema educativo rural del territorio investigado. La co-ocurrencia simultánea de C18 (valoración positiva de PhET) y C19 (barreras para implementarlo) como códigos de consenso unánime encapsula la paradoja central: la misma unanimidad que describe el deseo de implementar PhET describe también las barreras que lo impiden.

Los códigos con consenso alto (n=3): C08, C09 y C12 confirman que los desafíos pedagógicos y de seguridad, el abandono institucional y la barrera de conectividad son patrones que trascienden las particularidades de cada escuela. Los códigos de baja frecuencia (n=1–2), como C07 (recursividad docente), C14–C16 y C20–C21, reflejan condiciones y estrategias específicas de cada institución, señalando áreas donde la intervención debe personalizarse para maximizar su pertinencia contextual.

Citas representativas por categoría temática

Las siguientes citas textuales, seleccionadas por su representatividad analítica y densidad informativa, ilustran los hallazgos cualitativos centrales de cada categoría temática. Cada cita está codificada con los códigos Atlas.ti correspondientes.

Categoría C1 – Contexto institucional / C3 – Abandono institucional (C09) — I.E. Raúl Orejuela:

"El apoyo es nulo, porque de nada sirve donar unos equipos de laboratorio y no tener un espacio adecuado donde utilizarlos, o no tener los reactivos para que los estudiantes puedan hacer las prácticas. Es como si le dieran a uno un carro sin gasolina."

(Rector IE-R1, Entrevista 1, octubre 2025) [C09; C15]

Esta cita evidencia que los apoyos desarticulados no solo resultan ineficaces, sino que pueden generar frustración y desmotivación adicional entre los actores educativos. La metáfora del automóvil sin gasolina expresa con precisión el fenómeno de 'abandono institucional percibido' (C09): la ausencia de coherencia en las intervenciones es tan limitante como la ausencia de recursos materiales. Este hallazgo coincide con los resultados de Shambare y Jita (2025), quienes señalaron que las donaciones descoordinadas de equipos sin formación docente ni infraestructura de soporte constituyen uno de los patrones más recurrentes y contraproducentes en la adopción de TIC en escuelas rurales.

Categoría C5 – Valoración PhET + Barreras (C18 + C19) — I.E. Patricio Olave:

"La posibilidad de integrar simulaciones sería esplendoroso, sería un avance que toda institución desearía tener. El estudiante podría experimentar, manipular, ver los resultados... Pero para nuestra institución es difícil de implementar sin el apoyo del Estado, sin conectividad, sin equipos adecuados."

(Rector IE-R3, Entrevista 3, octubre 2025) [C18; C19; C12]

Esta cita encapsula la paradoja central del estudio con notable precisión. El uso del término 'esplendoroso' para describir la integración de simulaciones virtuales expresa la alta expectativa de rendimiento (UTAUT), mientras la enumeración de condiciones ausentes —apoyo estatal, conectividad, equipos— articula explícitamente las bajas condiciones facilitadoras. Esta articulación simultánea de alta valoración y explícito reconocimiento de barreras, presente en las cuatro instituciones (C18 y C19, n=4), confirma que la paradoja opera a nivel institucional y no solo individual.

Categoría C4 – Necesidad de formación docente (C17) — I.E. Raúl Orejuela:

"No se trata solo de abrir una simulación y mostrarla a los estudiantes, sino de saber cómo integrarla en una secuencia didáctica completa, qué preguntas hacer durante el proceso, cómo evaluar el aprendizaje que se está logrando. También sería muy útil contar con guías ya diseñadas y un acompañamiento continuo, no un taller de dos horas y después cada quien por su lado."

(Rector IE-R4, Entrevista 4, octubre 2025) [C17; C19]

Esta distinción entre alfabetización digital instrumental (saber usar la herramienta) y alfabetización digital pedagógica (saber integrarla curricularmente) constituye un aporte conceptual relevante. La demanda explícita de 'guías ya diseñadas' y 'acompañamiento continuo' señala que la formación docente efectiva debe ir más allá del entrenamiento técnico puntual para incluir materiales de apoyo contextualizados y modalidades de seguimiento sostenido. Este hallazgo se alinea con la investigación de Šumak et al. (2017), que identificó la influencia social y el apoyo de pares como predictores significativos del uso efectivo de tecnologías educativas.

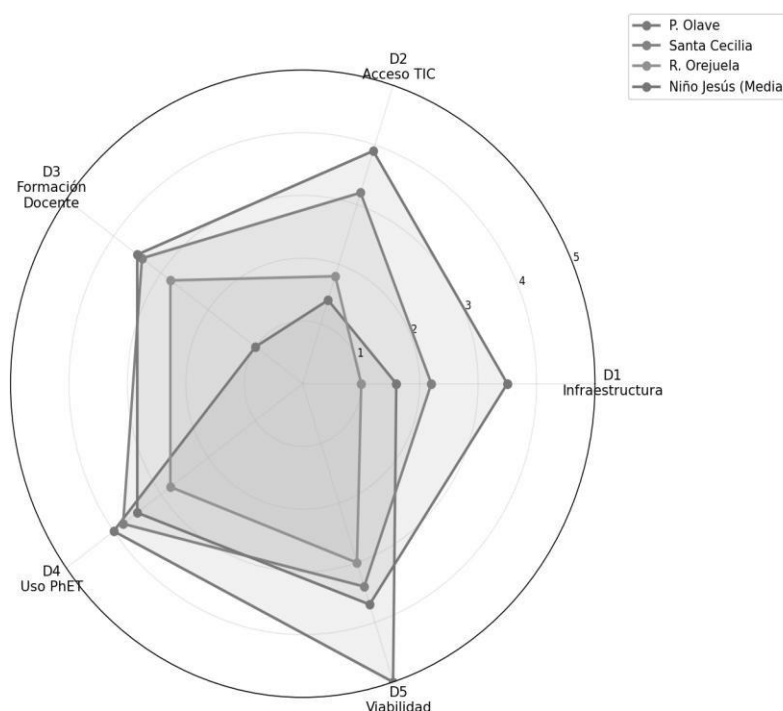
Categoría C2 – Estrategias pedagógicas alternativas (C06) — I.E. Santa Cecilia:

"Los docentes han desarrollado estrategias alternativas notables: fabricación de jabones con aceites vegetales, elaboración de indicadores de pH con repollo morado, extracción de ADN de frutas, y articulación de contenidos con prácticas agrarias tradicionales de la comunidad."

(Rector IE-R1, Entrevista 1, octubre 2025) [C06; C07]

Esta cita revela la recursividad docente como activo pedagógico en contextos de precariedad: ante la ausencia de recursos formales, los docentes desarrollan creativamente estrategias alternativas que articulan el currículo con los saberes y recursos del entorno. Este fenómeno, documentado como 'resiliencia educativa contextualizada', indica que la innovación pedagógica no requiere necesariamente de recursos tecnológicos de alta gama, sino de capacidad adaptativa informada por formación pedagógica sólida. Las simulaciones PhET tienen el potencial de formalizar y escalar estas estrategias creativas, proveyendo una plataforma que sistematiza la experimentación virtual con la misma flexibilidad que la recursividad docente aplicaba a los materiales disponibles.

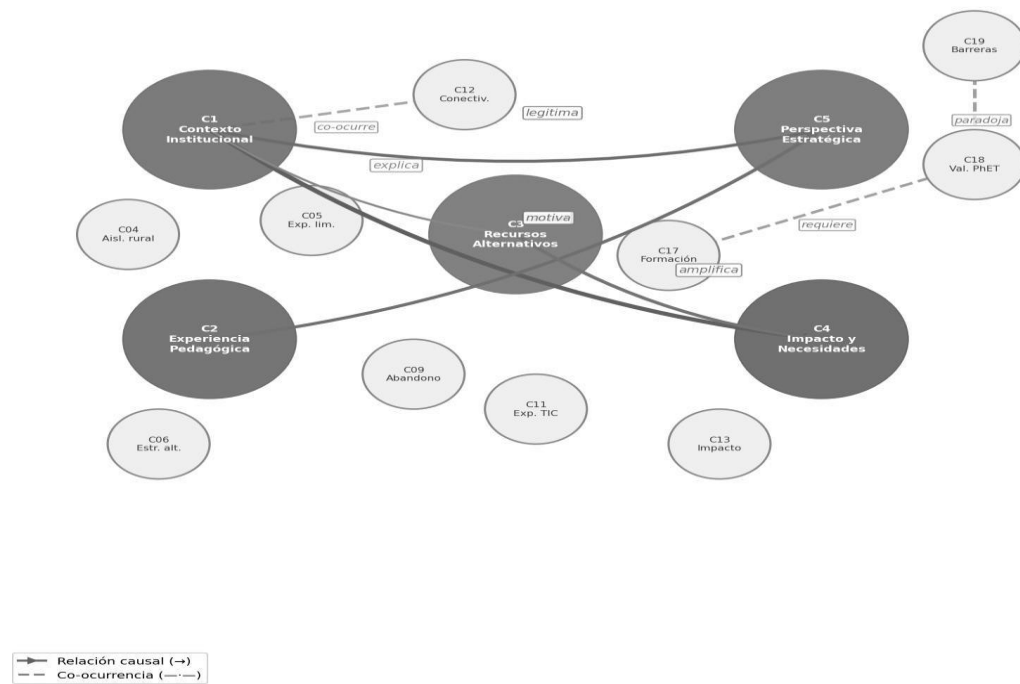
Figura 5. Perfil multidimensional por institución participante en las cinco dimensiones del cuestionario Likert (gráfico de radar)



Fuente: Elaboración propia con datos del cuestionario Likert (N=5) y análisis cualitativo Atlas.ti (N=4), 2025.

El gráfico de radar de la Figura 5 permite comparar visualmente el perfil multidimensional de cada institución educativa. Se observa que Niño Jesús de Praga (IE-R4, promedio de coordinadores A y B) presenta el perfil más equilibrado y elevado en las cinco dimensiones, consistente con el hecho de que esta institución es la única que reportó experiencias previas exitosas con PhET en el área de física (código C11, con evidencia de mejora en comprensión conceptual del átomo y reacciones). En contraste, los perfiles de R. Orejuela y P. Olave muestran la mayor brecha entre condiciones materiales (D1–D3 muy bajos) y receptividad hacia la innovación (D4–D5 altos), configurando el patrón de paradoja más pronunciado. Santa Cecilia presenta un perfil moderado en condiciones, pero sobresaliente en viabilidad percibida (D5), reflejando una disposición institucional para innovar que trasciende las carencias documentadas.

Figura 6. Red semántica de relaciones causales y co-ocurrencias entre categorías temáticas — Análisis Atlas.ti



Fuente: Elaboración propia con datos del cuestionario Likert (N=5) y análisis cualitativo Atlas.ti (N=4), 2025.

La Figura 6 representa las relaciones causales y de co-ocurrencia entre las cinco categorías temáticas identificadas en el análisis cualitativo. Las flechas de relaciones causales (líneas continuas con punta) revelan cuatro patrones relacionales fundamentales: (a) C1 → C4: la ausencia de infraestructura física y el aislamiento rural (C1) causan directamente el impacto negativo en los aprendizajes (C4), configurando la cadena causal más documentada en la literatura sobre educación rural; (b) C3 → C4: el abandono institucional y la barrera de conectividad (C3) amplifican el impacto negativo, creando un efecto multiplicador que agrava las consecuencias de las carencias de infraestructura; (c) C2 → C5: la creatividad pedagógica alternativa (C2) motiva la búsqueda activa de soluciones digitales como PhET (C5), estableciendo un puente entre la resiliencia docente y la adopción de innovaciones; y (d) C1 → C5: la precariedad de infraestructura legitima y justifica la adopción de simulaciones virtuales como alternativa necesaria, creando un argumento estructural para la innovación.

Las relaciones de co-ocurrencia (líneas discontinuas) destacan la paradoja C18↔C19: valoración de PhET y barreras de implementación aparecen juntas en las cuatro instituciones, confirmando su carácter estructuralmente vinculado. La co-ocurrencia C17→C18 (formación docente → valoración de PhET) señala que los actores que demandan mayor formación son también los que más valoran el potencial de las simulaciones, indicando una disposición al aprendizaje que las intervenciones de capacitación pueden capitalizar.

Triangulación metodológica: integración de hallazgos

La integración de los componentes cuantitativo y cualitativo mediante triangulación concurrente (Creswell & Plano Clark, 2018) permite obtener una comprensión comprehensiva y validada del fenómeno. La Tabla 6 presenta la matriz de triangulación por dimensión temática.

Tabla 6 Matriz de triangulación: contraste de hallazgos cuantitativos (Likert, N=5) y cualitativos (Atlas.ti, N=4) por dimensión temática

Dimensión / Categoría	Hallazgo cuantitativo	Hallazgo cualitativo	Convergencia	Implicación analítica
D1/C1 – Contexto e infraestructura	$\bar{x}=2.36$ (Bajo); $\alpha=0.864$	C01–C04; consenso n=2–4	Alta	La precariedad física es el principal obstáculo estructural, confirmado desde ambos métodos. No se trata de carencias individuales sino de abandono sistémico de política pública. Requiere intervención intersectorial.
D2/C3 – Acceso TIC	$\bar{x}=2.84$ (Moderado); $\alpha=0.945$	C09, C11, C12; consenso n=3–4	Alta	La conectividad es el cuello de botella operativo más crítico. El consenso cualitativo valida la estrategia offline como imperativo técnico, no como opción alternativa secundaria.
D3/C2 – Formación docente	$\bar{x}=2.84$ (Moderado); $\alpha=0.980$	C06, C07, C17; consenso n=3–4	Parcial	Los datos cuantitativos indican formación básica; los cualitativos revelan que es predominantemente individual, no institucionalizada ni sostenible. La brecha real es mayor de lo que los números sugieren.
D4/C5 – Valoración de PhET	$\bar{x}=3.52$ (Alto); $\alpha=0.516^*$	C18, C19; consenso n=4	Alta	Paradoja unánime: alta valoración + barreras unánimes. Los participantes conocen insuficientemente PhET (P16: $\bar{x}=2.20$) pero valoran altamente su potencial, configurando una ventana estratégica para intervenciones.
D5/C5 – Condiciones para implementar	$\bar{x}=3.76$ (Alto); $\alpha=0.888$	C18, C20, C21; consenso n=2–4	Alta con matiz	El consenso cuantitativo es mayor que el cualitativo: los coordinadores perciben más viabilidad que los rectores ante las mismas restricciones, posiblemente reflejando diferencias en el nivel de responsabilidad y contacto con las limitaciones cotidianas.

Nota. Triangulación siguiendo el procedimiento de integración concurrente (Creswell & Plano Clark, 2018). D=Dimensión cuantitativa (Likert); C=Categoría cualitativa (Atlas.ti). La convergencia 'Alta' se establece cuando ambos métodos señalan la misma dirección e intensidad del fenómeno; 'Parcial' cuando convergen en la tendencia pero difieren en la profundidad o matiz.

Discusión

La paradoja de la innovación digital en contextos de alta vulnerabilidad

El hallazgo central del estudio —la coexistencia de alta receptividad hacia la innovación digital (D4: $\bar{x}=3.52$; D5: $\bar{x}=3.76$; C18 n=4) con limitaciones estructurales severas que impiden su materialización (D1: $\bar{x}=2.36$; C12 n=3; C09 n=3)— se inscribe en una línea de investigación que ha documentado configuraciones similares en contextos educativos de países en desarrollo. Tarhini, Hone y Liu (2017), en un estudio con docentes universitarios de Líbano, identificaron que la alta expectativa de rendimiento no se traduce automáticamente en uso efectivo cuando las condiciones facilitadoras son críticamente insuficientes. Shambare y Jita (2025), en su revisión sistemática de 63 estudios en África subsahariana, describieron esta paradoja como 'aspirational digital adoption': las comunidades educativas rurales aspiran a integrar tecnologías que perciben como transformadoras, pero operan en condiciones sistémicas que bloquean su implementación espontánea.

El presente estudio aporta una matización relevante a esta literatura: la paradoja no se manifiesta únicamente a nivel individual (docentes que valoran pero no usan tecnologías), sino que opera a nivel institucional, donde los directivos-docentes reconocen explícitamente tanto el potencial de las simulaciones virtuales como las barreras sistémicas que impiden su implementación. Esta articulación institucional de la paradoja tiene implicaciones prácticas significativas, dado que los rectores y coordinadores académicos constituyen los actores con mayor

capacidad de agencia para gestionar recursos, establecer alianzas e impulsar cambios organizacionales. La paradoja institucional, en este sentido, no es un obstáculo sino una condición de posibilidad: indica disposición colectiva para el cambio en actores con capacidad de liderazgo.

Infraestructura y conectividad: barreras estructurales sistémicas

La dimensión D1 ($\bar{x}=2.36$) y los códigos cualitativos relacionados (C01–C04, frecuencias $n=2-4$) evidencian que la inequidad de infraestructura no es un problema individual de cada institución sino un fenómeno estructural que responde a políticas sostenidas de abandono territorial. Este hallazgo converge con Shambare y Jita (2025), quienes señalaron que en contextos rurales de países en desarrollo, la carencia de laboratorios equipados y de conectividad confiable no puede atribuirse a factores locales sino que refleja prioridades de inversión pública que reproducen sistemáticamente las desigualdades territoriales existentes.

La barrera de conectividad (C12, $n=3$) emerge como el cuello de botella operativo más crítico para la implementación de simulaciones virtuales. Este hallazgo valida empíricamente la estrategia offline como imperativo técnico para el contexto investigado, más que como opción alternativa secundaria. Las experiencias documentadas por Dorji (2024) en Bután —donde el 78% de las escuelas rurales carecía de acceso confiable a internet al momento de implementar PhET—y por Banda y Nzabahimana (2023) en Malaui confirman que la implementación offline no solo es viable sino que puede generar impactos académicos comparables a la implementación con conectividad plena, siempre que se garantice la formación pedagógica adecuada.

Formación docente: de la alfabetización instrumental a la pedagógica

La necesidad de formación docente (C17, consenso unánime $n=4$) y la distinción explícita entre formación técnica y pedagógica articulada por los rectores constituyen aportes que dialogan con la literatura especializada sobre desarrollo profesional docente en tecnología educativa. Friese (2019) señala que la apropiación pedagógica de tecnologías requiere de 'alfabetización de segundo orden' que trascienda el manejo técnico para abordar la integración curricular significativa. Los hallazgos del presente estudio confirman esta distinción en un contexto empírico específico: los directivos demandan explícitamente formación que aborde la secuenciación didáctica, el diseño de preguntas de indagación durante el uso de simulaciones y la evaluación del aprendizaje virtual.

El hallazgo de que la formación docente existente es predominantemente individual y no institucionalizada —evidenciado en la convergencia parcial entre D3 y C2— tiene implicaciones importantes para el diseño de programas de desarrollo profesional. Šumak et al. (2017) confirmaron que la influencia social, operacionalizada como el apoyo de colegas y la existencia de comunidades de práctica, constituye un predictor significativo de la intención de uso de tecnologías educativas, particularmente donde las condiciones facilitadoras son limitadas. Esta evidencia sugiere que las intervenciones de formación deben privilegiar modalidades colaborativas sobre las individuales, articulando los esfuerzos docentes en comunidades de aprendizaje con respaldo institucional explícito.

Recursividad docente y conexión con saberes locales

El código C06 (estrategias pedagógicas alternativas, consenso $n=4$) y las citas textuales asociadas revelan la existencia de un activo pedagógico frecuentemente subestimado en contextos de alta vulnerabilidad: la capacidad de adaptación creativa de los docentes ante la escasez de recursos. Las prácticas documentadas —fabricación de indicadores de pH caseros, extracciones de ADN de frutas, articulación con prácticas agrarias locales— no solo son pedagógicamente válidas sino que representan formas de contextualización curricular que articulan el conocimiento científico con los saberes territoriales de las comunidades del Pacífico. Sin embargo, estas estrategias son predominantemente individuales, insostenibles sin respaldo institucional y no reemplazan la experimentación sistemática que requiere la formación científica rigurosa.

Las simulaciones PhET tienen el potencial de formalizar y escalar estas estrategias creativas, pero su implementación exitosa requiere de formación pedagógica que ayude a los docentes a integrarlas en continuum con las prácticas alternativas que ya utilizan, más que como sustitución de estas. Esta perspectiva, que valora el capital pedagógico existente en las instituciones rurales, se alinea con los planteamientos constructivistas de Vygotsky (1978) sobre el papel de los saberes previos en el aprendizaje y con los enfoques de pedagogías contextualizadas propuestos para comunidades con identidades culturales específicas.

Contribución al campo de la tecnología educativa en América Latina

El presente estudio constituye una contribución empírica original a la literatura internacional sobre adopción de tecnologías educativas en contextos rurales latinoamericanos, región históricamente subrepresentada en la investigación sobre laboratorios virtuales. Los hallazgos confirman la validez de constructo del UTAUT aplicado a contextos educativos rurales de países en desarrollo, pero también revelan la necesidad de matizar sus predicciones cuando las condiciones facilitadoras son críticamente insuficientes. En tales contextos, la expectativa de rendimiento por sí sola no es suficiente para generar uso efectivo; se requieren estrategias de implementación que articulen simultáneamente las dimensiones técnica (conectividad offline), pedagógica (formación contextualizada) e institucional (alianzas y sostenibilidad), superando las intervenciones focalizadas exclusivamente en la dotación de equipos.

Propuesta de alfabetización digital en química para instituciones educativas rurales de Buenaventura

Fundamentación y objetivo

Los hallazgos empíricos obtenidos evidencian una paradoja institucional que demanda una respuesta integral: la elevada receptividad hacia la innovación digital (D4: $\bar{x}$ =3.52; D5: $\bar{x}$ =3.76; C18 n=4) coexiste con condiciones estructurales que bloquean su implementación espontánea (D1: $\bar{x}$ =2.36; C12 n=3; C09 n=3). La resolución de esta paradoja no puede abordarse con intervenciones focalizadas en una sola dimensión —ya sea la dotación tecnológica, la formación docente o la gestión institucional—, sino que requiere una estrategia integral que opere simultáneamente en las tres dimensiones del problema.

El objetivo de la propuesta es diseñar e implementar una estrategia de alfabetización digital en química para las cuatro instituciones educativas rurales participantes, utilizando simulaciones PhET como herramienta central, articulando dimensiones técnicas (implementación offline), pedagógicas (formación docente contextualizada) e institucionales (alianzas y sostenibilidad), en respuesta explícita a los hallazgos empíricos del estudio.

Tabla 7 *Propuesta integral de alfabetización digital en química: dimensiones, estrategias, acciones, actores y fundamento empírico*

Dimensión	Estrategia central	Acciones clave	Actores responsables	Fundamento empírico del estudio
Técnica	Implementación offline PhET	Descarga del paquete PhET completo en smartphones Android/iOS. Configuración de servidor local en tablet/PC sin internet. Simulaciones prioritarias: Estados de la Materia, Ácido-Base, Equilibrio Químico (alineadas al	Coordinadores TIC, Apoyo técnico externo (MinTIC)	D2 $\bar{x}$ =2.84; C12 n=3 (barrera conectividad); experiencias offline Dorji (2024); Banda & Nzabahimana (2023)

		currículo de grados 10° y 11°)		
Pedagógica	Formación docente contextualizada	Taller intensivo ≥12 horas: diseño de secuencias didácticas completas con PhET (objetivo, actividad, evaluación). Guías didácticas adaptadas al contexto rural y saberes locales del Pacífico. Acompañamiento continuo por tutor durante ≥1 semestre escolar. Comunidades de práctica entre docentes de las cuatro instituciones	Universidades del Pacífico colombiano, Docentes de química, Tutores especializados	C17 n=4; C06 n=4; distinción técnica/pedagógica (Rector IE-R4); Šumak et al. (2017); Frieze (2019)
Institucional	Alianzas intersectoriales y PEI	Convenios formales con MinTIC, universidades del Pacífico y fundaciones del sector privado. Inclusión de alfabetización digital en química en el PEI como componente estructural. Conformación de comité TIC institucional. Plan Sectorial de Mejoramiento SED Buenaventura	Rectores, SED Buenaventura, MinTIC, Universidades, Sector privado	D5 $\bar{x}$ =3.76; C18 n=4; C20 n=2; C21 n=2; Shambare & Jita (2025)

Nota. PEI=Proyecto Educativo Institucional; SED=Secretaría de Educación Distrital; MinTIC=Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. La estrategia de implementación offline permite operación plena de PhET sin requerir conectividad a internet, resolviendo la barrera estructural más crítica identificada (C12, n=3).

Fases de implementación y cronograma

La implementación de la propuesta se organiza en tres fases secuenciales con evaluación continua. La Fase I (Preparación, meses 1–2) contempla: diagnóstico participativo con docentes de química, configuración técnica offline en dispositivos disponibles, diseño de guías didácticas contextualizadas y gestión de acuerdos de alianza. La Fase II (Implementación, meses 3–8) incluye: formación docente inicial (taller ≥12 horas), implementación gradual en clases con acompañamiento de tutor (visitas quincenales), conformación de comunidades de práctica virtuales/presenciales, y registro sistemático de experiencias para ajuste progresivo. La Fase III (Consolidación y sostenibilidad, meses 9–12) comprende: evaluación de impacto en aprendizajes y actitudes hacia la química, institucionalización en el PEI, formación de nuevos docentes incorporados, sistematización de aprendizajes y formulación de recomendaciones para escalabilidad territorial.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Conclusión 1 — Inequidad estructural de infraestructura. Las condiciones de infraestructura para la enseñanza de la química en las instituciones educativas rurales de Buenaventura son críticamente insuficientes (D1: $\bar{x}=2.36$; C01–C04, consenso $n=2-4$). Los hallazgos confirman que esta precariedad no es atribuible a factores individuales o circunstanciales, sino que refleja una inequidad estructural de origen sistémico que ha sido documentada longitudinalmente en el territorio. La unanimidad de los códigos C04 (aislamiento rural) y C13 (impacto negativo en aprendizaje) en las cuatro instituciones señala que las consecuencias de esta inequidad sobre los resultados académicos son ya visibles y están siendo reconocidas por los propios directivos institucionales.

Conclusión 2 — Paradoja institucional: receptividad y bloqueo estructural. Los directivos-docentes de las cuatro instituciones perciben alta pertinencia, utilidad y viabilidad para implementar simulaciones PhET (D4: $\bar{x}=3.52$; D5: $\bar{x}=3.76$; C18 $n=4$), coexistiendo con plena consciencia de las barreras que impiden su materialización espontánea (C19 $n=4$). Esta paradoja, coherente con las predicciones del UTAUT para configuraciones de alta expectativa de rendimiento con bajas condiciones facilitadoras, opera no solo a nivel individual docente sino a nivel de liderazgo institucional, lo que constituye una condición favorable para intervenciones que capitalicen la disposición de los actores con mayor capacidad de agencia.

Conclusión 3 — Triangulación con convergencia alta. La triangulación metodológica de los componentes cuantitativo y cualitativo confirma convergencia alta entre ambos métodos en cuatro de las cinco dimensiones temáticas analizadas. La convergencia parcial en D3/C2 (formación docente) revela que la formación existente es más precaria de lo que los datos cuantitativos sugieren en primera lectura: es predominantemente individual, no institucionalizada y no sostenible. Este hallazgo refuerza la importancia de los diseños mixtos para la comprensión de fenómenos complejos donde los promedios cuantitativos pueden enmascarar heterogeneidades cualitativas significativas.

Conclusión 4 — Propuesta integral como respuesta empíricamente fundamentada. La propuesta de alfabetización digital diseñada en OE3 —que articula estrategias técnicas (offline), pedagógicas (formación contextualizada ≥ 12 horas con acompañamiento continuo) e institucionales (alianzas intersectoriales y PEI)— constituye una respuesta coherente y empíricamente fundamentada a la paradoja identificada. Su implementación requiere simultaneidad en las tres dimensiones: intervenciones focalizadas exclusivamente en una de ellas replicarían el patrón de 'apoyo desarticulado' documentado en el código C09 como contraproducente.

Recomendaciones

A directivos-docentes de instituciones rurales: Iniciar la implementación de PhET en modalidad offline como primera acción de bajo costo utilizando los smartphones disponibles. Configurar el paquete PhET descargado en al menos dos dispositivos por institución y priorizar las simulaciones de Estados de la Materia, Reacciones Ácido-Base y Equilibrio Químico, directamente vinculadas al currículo de ciencias de grados 10° y 11°.

A programas de formación y universidades: Diseñar e implementar talleres de formación de mínimo 12 horas que diferencien explícitamente entre alfabetización digital instrumental y pedagógica, incluyendo el diseño de secuencias didácticas completas con PhET, el diseño de preguntas de indagación para uso durante las simulaciones y la evaluación del aprendizaje virtual. Incluir modalidades de acompañamiento continuo (≥ 1 semestre) que privilegien las comunidades de práctica sobre los talleres individuales.

A entidades de cooperación y responsabilidad social: Formalizar acuerdos de alianza intersectorial con universidades del Pacífico colombiano, MinTIC y fundaciones del sector privado

para gestionar equipos básicos, opciones de conectividad satelital y programas de capacitación docente continua. Los rectores señalaron explícitamente esta necesidad como condición necesaria para la sostenibilidad de las innovaciones, indicando alta disposición institucional para articular con actores externos.

A la Secretaría de Educación Distrital de Buenaventura: Formular un Plan Sectorial de Mejoramiento de la Educación Rural que contemple: adecuación de laboratorios de ciencias, dotación de equipos tecnológicos básicos, mejora de conectividad mediante tecnologías alternativas (satelital, radioenlaces), y un programa sistemático y sostenido de formación docente en integración de TIC. Articular con el Plan Nacional de Infraestructura Educativa y los programas nacionales de conectividad rural.

Limitaciones y líneas futuras de investigación

El presente estudio presenta limitaciones que deben considerarse al interpretar sus hallazgos. El tamaño de muestra (N=9 participantes, cuatro instituciones) limita la generalización estadística; sin embargo, el diseño exploratorio-fenomenológico no persigue representatividad estadística sino profundidad comprensiva y transferibilidad contextual (Yin, 2018). La selección por conveniencia introduce sesgo de acceso que debe ser reconocido. Asimismo, el estudio no incluye las perspectivas de docentes de química ni de estudiantes, actores cuyas voces complementarían sustancialmente la comprensión del fenómeno.

Líneas futuras de investigación: (a) ampliar la muestra a un mayor número de instituciones del Pacífico colombiano y otras regiones rurales del país con condiciones similares; (b) incorporar la perspectiva de docentes de ciencias y estudiantes mediante grupos focales y observación de clases; (c) evaluar el impacto de intervenciones de implementación de PhET mediante diseños cuasiexperimentales con mediciones pre-post; y (d) desarrollar estudios longitudinales que documenten los procesos de apropiación pedagógica de simulaciones virtuales en el mediano y largo plazo, permitiendo comprender cómo evolucionan las paradojas identificadas cuando las condiciones de implementación mejoran progresivamente.

Referencias

- Adams, W. K., Reid, S., LeMaster, R., McKagan, S., Perkins, K., Dubson, M., & Wieman, C. (2008). A study of educational simulations part I — Engagement and learning. *Journal of Interactive Learning Research*, 19(3), 397–419.
- Aponte Rodríguez, N. F., Zambrano Tintinago, B. Y., & Freire Tigreros, J. L. (2021). Educación virtual en tiempos de crisis: Retos y posibilidades. *Revista Ciencia e Innovación en Salud*, 3(1), 17–28. <https://doi.org/10.5377/rcis.v3i1.11112>
- Aydin, S. (2020). Technology integration in science education: A review of the literature. *Journal of Science Education and Technology*, 29(4), 505–520. <https://doi.org/10.1007/s10956-020-09839-1>
- Banda, H. J. (2023). The impact of PhET simulation-based learning on students' motivation and academic achievement. *Journal of Science Education and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s10956-023-09964-0>
- Banda, H. J., & Nzabahimana, J. (2023). Interactive simulations and students' motivation in science learning: Evidence from Malawi. *Journal of Science Education and Technology*, 32(5), 745–762. <https://doi.org/10.1007/s10956-023-10010-7>
- Bardin, L. (2011). *Análisis de contenido* (3ª ed.). Akal.
- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and conducting mixed methods research* (3rd ed.). SAGE Publications.
- Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS Quarterly*, 13(3), 319–340. <https://doi.org/10.2307/249008>

- de Jong, T., Linn, M. C., & Zacharia, Z. C. (2013). Physical and virtual laboratories in science and engineering education. *Science*, 340(6130), 305–308. <https://doi.org/10.1126/science.1230579>
- Dorji, T. (2024). De-mystifying the influence of PhET simulation on engagement and satisfaction. *Journal of Science Education and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s10956-024-10056-4>
- Downes, S. (2012). *Connectivism and connective knowledge: Essays on meaning and learning networks*. National Research Council Canada.
- Elmoazen, R., Saqr, M., Khalil, M., & Wasson, B. (2023). Learning analytics in virtual laboratories: A systematic literature review of empirical research. *Smart Learning Environments*, 10(1), 1–22. <https://doi.org/10.1186/s40561-023-00245-1>
- Friese, S. (2019). *Qualitative data analysis with ATLAS.ti* (3rd ed.). SAGE Publications.
- George, D., & Mallery, P. (2003). *SPSS for Windows step by step: A simple guide and reference* (4th ed.). Allyn & Bacon.
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2022). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (7.ª ed.). McGraw-Hill.
- Lawshe, C. H. (1975). A quantitative approach to content validity. *Personnel Psychology*, 28(4), 563–575. <https://doi.org/10.1111/j.1744-6570.1975.tb01393.x>
- Manyilizu, M. C. (2022). Effectiveness of virtual laboratory versus paper-based tasks on students' conceptual learning. *Journal of Science Education and Technology*, 31(3), 285–298. <https://doi.org/10.1007/s10956-022-09944-1>
- Ministerio de Educación Nacional de Colombia. (2006). *Estándares básicos de competencias en ciencias naturales*. MEN.
- Moore, E. B. (2014). PhET interactive simulations: Transformative tools for teaching chemistry. *Journal of Chemical Education*, 91(9), 1191–1205. <https://doi.org/10.1021/ed4005084>
- Morgan, D. L. (2014). *Integrating qualitative and quantitative methods: A pragmatic approach*. SAGE Publications.
- Perkins, K. K., Adams, W. K., Dubson, M., Finkelstein, N. D., Reid, S., Wieman, C. E., & LeMaster, R. (2012). PhET: Interactive simulations for teaching and learning physics. *The Physics Teacher*, 48(1), 18–23. <https://doi.org/10.1119/1.4782485>
- Potkonjak, V., Gardner, M., Callaghan, V., Mattila, P., Guetl, C., Petrović, V. M., & Jovanović, K. (2016). Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: A review. *Computers & Education*, 95, 309–327. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.02.002>
- Rutten, N., van Joolingen, W. R., & van der Veen, J. T. (2012). The learning effects of computer simulations in science education. *Computers & Education*, 58(1), 136–153. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.07.017>
- Secretaría de Educación Distrital de Buenaventura. (2024). *Informe de gestión y estadísticas educativas 2024*. Alcaldía de Buenaventura.
- Shambare, R., & Jita, T. (2025). Barriers to ICT adoption in rural schools: A systematic review. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 22(1), 1–25. <https://doi.org/10.1007/s41239-025-00450-1>
- Siemens, G. (2005). Connectivism: A learning theory for the digital age. *International Journal of Instructional Technology and Distance Learning*, 2(1), 3–10.
- Smetana, L. K., & Bell, R. L. (2012). Computer simulations to support science instruction and learning: A critical review of the literature. *International Journal of Science Education*, 34(9), 1337–1370. <https://doi.org/10.1080/09500693.2011.605182>
- Strauss, A., & Corbin, J. (1998). *Basics of qualitative research: Techniques and procedures for developing grounded theory* (2nd ed.). SAGE Publications.
- Šumak, B., & Šorgo, A. (2016). The acceptance and use of interactive whiteboards among teachers. *Computers in Human Behavior*, 64, 602–620. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.07.037>

- Šumak, B., Heričko, M., & Pušnik, M. (2017). A meta-analysis of e-learning technology acceptance. *Computers in Human Behavior*, 72, 591–602. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.11.091>
- Tarhini, A., Hone, K., & Liu, X. (2017). The effects of individual differences on e-learning users' behaviour in developing countries. *Computers in Human Behavior*, 41, 153–163. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2014.09.020>
- Teo, T. (2011). Factors influencing teachers' intention to use technology. *Computers & Education*, 57(4), 2432–2440. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.06.008>
- Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D. (2003). User acceptance of information technology: Toward a unified view. *MIS Quarterly*, 27(3), 425–478. <https://doi.org/10.2307/30036540>
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Harvard University Press.
- Wieman, C. E., Adams, W. K., & Perkins, K. K. (2010). PhET: Simulations that enhance learning. *Science*, 322(5902), 682–683. <https://doi.org/10.1126/science.1161948>
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE Publications.
- Zhang, Y. (2024). Virtual laboratories in science education: A systematic review. *Journal of Science Education and Technology*, 33(2), 123–141. <https://doi.org/10.1007/s10956-023-10012-3>