The Biologist (Lima), 2026, vol. 24(2), XX-XX.

DOI: https://doi.org/10.62430/rtb20262422270

Este artículo es publicado por la revista The Biologist (Lima), de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática de la Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es], que permite el uso, la distribución y la reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada como su fuente original.

ORIGINAL ARTICLE / ARTÍCULO ORIGINAL

SMART DIDACTIC ITINERARIES: A RESPONSE TO CLIMATE CHANGE EDUCATION

ITINERARIOS DIDÁCTICOS INTELIGENTES: UNA RESPUESTA A LA EDUCACIÓN PARA EL CAMBIO CLIMÁTICO

Adrián Ruiz-Hernández[1*], Oliday Aguilar-Espinosa[2], José Iannacone[3,4] Rafael Armiñana-García[2] & Denis Simard[2]

[1*] Escuela Pedagógica «Manuel Ascunce Domenech». E-mail: adrianruizhernandez22@gmail.com

[2] Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, Villa Clara, Cuba. E-mail: oaguilar@uclv.cu / rarminana@uclv.cu/dsdenisimard@gmail.com

[3] Laboratorio de Investigación en Ecología y Biodiversidad Animal (LEBA). Facultad de Ciencias Naturales y Matemática (FCNNM). Grupo de Investigación en Sostenibilidad Ambiental (GISA). Escuela Universitaria de Posgrado (EUPG). Universidad Nacional Federico Villarreal (UNFV). Lima, Perú.

[4] Laboratorio de Zoología. Facultad de Ciencias Biológicas. Grupo de Investigación Biodiversidad, Ecosistemas y Cambio Global. Escuela de posgrado (EPG). Universidad Ricardo Palma (URP). Lima, Perú. E-mail: joseiannacone@gmail.com

* Corresponding author: E-mail: rarnimama@uclv.cu

Ruiz-Hernández *et al.*

Titulillo: Smart didactic itineraries

Adrián Ruiz-Hernández: https://orcid.org/0009-0001-6743-9654

Oliday Aguilar-Espinosa: https://orcid.org/0000-0001-8341-8637
Rafael Armiñana-García: https://orcid.org/0000-0003-2655-7002
José Iannacone: https://orcid.org/0000-0003-3699-4732
Denis Simard: https://orcid.org/0009-0006-9063-8578

ABSTRACT

This article addresses intelligent learning pathways as a strategy for teacher training, specifically for Biology teachers, within the framework of Education for Climate Change (ECC). This is a topic of great importance in current pedagogy, as it aligns with Education for Sustainable Development as a global necessity for achieving the 2030 Agenda. Different methods and techniques for data collection and processing are used to determine the needs and potential for implementing the proposed approach. A pedagogical framework is presented that integrates various learning environments, both virtual and real-world, to contribute to the development of students' professional competencies. The results suggest that this approach strengthens knowledge, skills, and qualities for their work as Biology teachers and, simultaneously, as scientists, allowing for didactic transposition to other contexts.

Keywords: Climate Change Education – Didactic Itinerary – Teacher Training-Smart Pedagogical Organization – Educational Innovation

RESUMEN

El artículo aborda los itinerarios didácticos inteligentes como una estrategia para la formación de profesores, específicamente de biología, bajo el enfoque de Educación para el Cambio Climático (ECC). Es un tema de gran importancia en la pedagogía actual, pues se alinea con la Educación para el Desarrollo Sostenible como una necesidad global para el cumplimiento de la Agenda 2030. Se utilizan diferentes métodos y técnicas de recogida y procesamiento de datos, los cuales permiten determinar las necesidades y potencialidades para la realización de la propuesta. Se presenta una organización pedagógica que integra diferentes entornos de aprendizaje tanto virtuales como reales para contribuir al desarrollo de competencias profesionales en los estudiantes. Los resultados sugieren que esta modalidad fortalece conocimientos, habilidades y cualidades para su trabajo como profesor de biología y a la vez como científico, lo que permite la transposición didáctica a otros contextos de actuación.

Keywords: Educación para el Cambio Climático – Formación de profesores – Organización pedagógica inteligente – Innovación educacional – Itinerarios didácticos

INTRODUCCIÓN

La crisis ecológica global, manifestada en fenómenos como el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, la escasez de recursos y la desigualdad ambiental, ha generado una creciente conciencia sobre la necesidad de que los sistemas educativos formen ciudadanos capaces de comprender, evaluar críticamente y actuar frente a esos retos (Palazón-Carrión & Serrano Sánchez, 2025).

Este fenómeno, del cambio climático, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, 1992) lo define como: "un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables", subrayando el papel de las emisiones de gases de efecto invernadero de origen antropogénico. Esta caracterización científica constituye la base epistemológica de la educación para el cambio climático, que busca que los estudiantes comprendan sus causas y consecuencias y desarrollen capacidades para responder a este fenómeno (UNESCO, 2024).

En este orden, la educación para el cambio climático se precisa hoy como el conjunto de acciones que realizan los profesores para fortalecer conocimientos científicos, competencias, valores y actitudes hacia la mitigación, la adaptación y la justicia climática en sus contextos locales. En los últimos años, a nivel mundial y en Cuba, se considera un eje estratégico para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible, sobre educación para el desarrollo sostenible (Zamora-Hernández *et al*., 2025).

En este sentido, la Educación para el Cambio Climático (ECC) se considera parte de la Educación para el Desarrollo Sostenible (EDS) que emerge como un mandato internacional, promovido por organismos como la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco), para integrar en los currículos competencias científicas, éticas y prácticas que favorezcan un futuro sostenible. Sin embargo, lograr esta integración de manera efectiva exige innovación metodológica, formación docente específica y recursos adaptados a las particularidades disciplinarias (Guterres, 2021).

En correspondencia, la biología es una disciplina clave para la comprensión de los sistemas vivos, los ecosistemas, la salud ambiental y los servicios ecosistémicos. Su enseñanza debe ser orientada a la ECC y la sostenibilidad no solo debe transmitir contenidos, sino también promover habilidades de pensamiento crítico, indagación, conciencia ecológica y responsabilidad social.

Simultáneamente, en los últimos años se ha observado una expansión notable en el uso de la Inteligencia Artificial (IA) en educación, especialmente en contextos de enseñanza superior y

formación docente (Mur *et al*., 2025). La IA ofrece herramientas con el potencial de personalizar el aprendizaje, proporcionar retroalimentación automática, detectar dificultades de aprendizaje, modelar fenómenos complejos y apoyar al profesor en la planificación y evaluación (Ajibike, 2025). Estas posibilidades pueden resultar especialmente valiosas cuando se combinan con los fines de la EDS: preparar futuros profesores que no solo dominen los contenidos biológicos, sino que sepan utilizarlos para fomentar prácticas sostenibles, promover valores ambientales y motivar acciones colectivas orientadas a la ECC.

No obstante, aunque las perspectivas de la IA en educación son prometedoras, los estudios recientes señalan que su incorporación es un desafío para los profesores del futuro. Entre ellos destacan: la brecha de competencias digitales y pedagógicas entre docentes, la necesidad de alfabetización en IA para comprender sus mecanismos y limitaciones, los problemas éticos como el sesgo y la privacidad, la accesibilidad desigual de tecnologías, y la falta de marcos instruccionales bien diseñados que integren IA con objetivos educativos claros (Arias-Valle & Marimon, 2025; Daher, 2025; Kazmaci *et al*., 2025; UNESCO, 2025ab).

Al revisar estudios recientes, a nivel internacional emergen algunas tendencias relevantes, como el uso de IA en la educación de la sostenibilidad, donde se presenta un estudio multicase a escala internacional que analiza cómo la IA está siendo utilizada en la enseñanza de la sostenibilidad, destacando su eficacia para ofrecer rutas de aprendizaje personalizadas, simulaciones interactivas sobre problemas ambientales complejos y retroalimentación en tiempo real. Este estudio evidencia que la IA puede mejorar significativamente la experiencia de aprendizaje sostenido, aunque alerta sobre los riesgos relacionados con la ética, la transparencia de los algoritmos y la equidad de acceso.

En este orden, se evidencia en otra investigación que la IA en la enseñanza de la biología aporta un estudio comparativo reciente sobre las percepciones y el nivel de conocimiento tecnológico-pedagógico-disciplinar (TPACK) de futuros profesores de biología en Sudáfrica e Indonesia respecto a la integración de IA en su disciplina. Los resultados sugieren que muchos están conscientes de los beneficios potenciales como: mejoras en el aprendizaje de conceptos biológicos, mayor motivación del estudiante y más posibilidades de recursos personalizados, pero también muestran lagunas importantes en formación práctica, infraestructura y apoyo institucional (Mnguni *et al.,* 2026).

Al respecto, se precisan otras investigaciones relacionadas con la intención de uso de sistemas inteligentes en Biología, las competencias docentes para integrar IA, los Itinerarios didácticos y la personalización del aprendizaje donde se manifiesta que el empleo de IA en la formación de profesores mediante el empleo de sistemas de tutoría inteligente para enseñar genética en

educación secundaria, encontrando que normas sociales, percepciones de utilidad, actitudes y creencias influyen fuertemente en la intención de su empleo. También se han propuesto marcos de competencias docentes con perspectiva ética y sostenible, que incluyen conocimientos sobre fundamentos de la IA, su aplicación pedagógica, sus implicaciones éticas, y una actitud centrada en el ser humano. Otros muestran que las rutas o itinerarios formativos flexibles que permiten adaptarse al ritmo del estudiante, ofrecer retroalimentación personalizada y combinar recursos digitales y presenciales favorecen el aprendizaje significativo y el compromiso (Adelana *et al*., 2024; Panda *et al*., 2024; Kazmaci *et al.,* 2025).

En el contexto internacional, se evidencia en las revisiones sistemáticas recientes que la formación docente sobre cambio climático ha pasado de experiencias aisladas a programas más estructurados, con énfasis en la integración curricular y en el desarrollo de competencias para la acción climática y la justicia ambiental (The MECCE Project, 2024). Se identifican tres tendencias: la incorporación de adaptación, mitigación y resiliencia como ejes formativos; el tránsito de enfoques puramente disciplinares hacia propuestas inter y transdisciplinarias; y la consolidación de comunidades de práctica y modelos de aprendizaje profesional colaborativo para docentes (Asian Centre for Teacher Education for Sustainable Development, 2024). En Cuba, se ha incorporado el cambio climático dentro de la Estrategia Nacional de Educación Ambiental y la Estrategia para elevar la calidad de la educación 2020-2030 en el Ministerio de Educación, con líneas específicas de formación de profesores, investigación educativa y producción de recursos didácticos (UNESCO, 2025ab).

En consecuencia, el Estado asume el Plan para el Enfrentamiento al Cambio Climático (Tarea Vida) y los procesos de perfeccionamiento del Sistema Nacional de Educación que promueven la inclusión de contenidos de cambio climático en planes de estudio, orientaciones metodológicas y materiales escolares y reconocen la capacitación de los profesores como condición para la mitigación, la adaptación y la participación social informada (MECCE Project & UNESCO, 2024).

En correspondencia, en los últimos años se destacan investigadores como Fernández (2010), Martínez (2017), Aguilar-Espinosa *et al*. (2023) y Valenzuela-Santoyo *et al.* (2023). Los mismos, proponen soluciones didácticas y novedosas como los itinerarios didácticos a partir de modelos útiles para la formación de profesores, principalmente en Geografía pero con aplicabilidad a ciencias como la Biología, con un enfoque en la Educación para el Desarrollo Sostenible (EDS), los cuales buscan facilitar la asimilación de conocimientos, actitudes y habilidades profesionales mediante el estudio integral de espacios y el uso de variadas tecnologías educativas mediante métodos participativos y problémicos que sensibilizan sobre

problemáticas ambientales y relacionadas con el cambio climático, fortalecen valores y desarrollan habilidades científicas, reflexión crítica, creatividad y uso de tecnologías en la formación de profesores de ciencias como Geografía y Biología.

En este sentido, la enseñanza de la biología ha evolucionado históricamente hacia una mayor integración teórico-práctica y uso de tecnologías de la información, aunque persisten desafíos para integrar contenidos de forma que reflejen un enfoque hacia la educación para el cambio climático, la formación activa de los futuros profesores y el uso de las TIC, con énfasis en la inteligencia artificial (IA).

En los documentos normativos de las Escuelas Pedagógicas se precisa que la asignatura Biología adquiere un nivel de profundización de los contenidos esenciales, por lo que se centra en el estudio de la vida con una perspectiva más integradora y generalizadora. Por lo tanto, para la selección y tratamiento de estos contenidos han tenido prioridad cuatro enfoques: enfoque explicativo integrador, ecosistémico, evolutivo y bioético. Por lo que se necesita integrar habilidades generales, intelectuales, comunicativas, docentes, investigativas y habilidades prácticas específicas de la especialidad. Los métodos didácticos y las formas de organización del proceso para el logro de estos aprendizajes deben ser activos, productivos, dar espacio para la actividad creadora y valorativa por los estudiantes, potenciar las actividades prácticas en los laboratorios y otros espacios de la escuela y la comunidad, de manera que los conocimientos sean apropiados desde la realidad objetiva, mediante las vivencias y experiencias de los estudiantes. Los medios de enseñanza que se empleen para este aprendizaje deben hacer énfasis en el uso independiente tanto de medios tradicionales como de los más modernos, como las TIC, entre ellos las IA.

En este contexto, los itinerarios didácticos inteligentes contribuyen a tales propósitos. Sin embargo, hay poca evidencia empírica de que los itinerarios didácticos combinen IA, biología y educación para el cambio climático, especialmente en la formación de profesores. Aunque hay estudios sobre IA en Biología y Educación para el cambio climático y algunos sobre itinerarios didácticos flexibles, es escasa la investigación que articule todos estos componentes: itinerarios didácticos inteligentes, Biología, Educación para el cambio climático y formación de profesores.

En consideración, la crisis climática exige que la formación de profesores de biología trascienda la enseñanza de contenidos teóricos y se mueva hacia una pedagogía de la complejidad. Los itinerarios didácticos representan buenas prácticas que articulan el pensamiento espacial y biológico (Aguilar-Espinosa *et al*., 2023). El problema radica en la rigidez de las clases tradicionales que no logran conectar los datos globales con los ecosistemas

locales. El objetivo de esta investigación es proponer un itinerario didáctico inteligente para la enseñanza de la biología orientado a la educación para el cambio climático y a la formación de profesores en la Escuela Pedagógica como respuesta a los desafíos actuales de la educación.

En esta investigación se asume el criterio de Aguilar-Espinosa *et al.* (2023) al considerar los rasgos que caracterizan el itinerario didáctico en la formación de profesores en las Escuelas Pedagógicas, siendo los siguientes:

- Contribuye a la percepción, observación y comprensión de los paisajes de forma holística.
- Es un modo de organizar y guiar la enseñanza, considerado como una forma de organización.
- Se ajuste a las particularidades de la formación de profesores para secundaria básica en las Escuelas Pedagógicas.
- Contribuye al desarrollo de competencias profesionales en los tres ámbitos: cognitivo, procedimental y actitudinal.
- Aprovecha los diferentes entornos de aprendizaje de la realidad objetiva o de las representaciones virtuales de la realidad objetiva.
- Estudia los paisajes a escala local, regional o global.
- Se alinea con los conocimientos, habilidades y cualidades de la Educación para el Desarrollo Sostenible.
- Es un recorrido, viaje, paseo, travesía o ruta.

En este sentido, se asume el itinerario didáctico inteligente como la incorporación de las tecnologías digitales y herramientas interactivas para potenciar la experiencia educativa. Estos itinerarios no solo integran medios tradicionales como la lectura y la observación, sino que incluyen aplicaciones móviles, realidad aumentada y plataformas digitales que permiten contextualizar y adaptar el aprendizaje según las necesidades y respuestas del estudiante (Ortega-Chinchilla *et al.*, 2023).

En correspondencia, de acuerdo con las tendencias actuales en la formación de profesores, la inteligencia de una forma de organización se mide por su capacidad de integrar la inteligencia colectiva y el análisis de aprendizaje; debe estructurarse bajo el modelo de Aprendizaje Profundo. Según estudios sobre la formación docente, el profesor actúa como un arquitecto de entornos, donde la organización es lo más importante mientras el estudiante gana autonomía. Un itinerario se considera inteligente si incorpora algoritmos de recomendación o rutas diversificadas. No todos los estudiantes deben recorrer el mismo camino para llegar al mismo objetivo de aprendizaje (Vélez-Vélez, 2021; Álvarez-Saiz *et al*., 2023).

En consecuencia, para considerar una forma de organización inteligente como los itinerarios didácticos se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Adaptabilidad: La estructura de la actividad permite cambios de ritmo o dirección basados en las respuestas o dudas emergentes de los estudiantes, o sea, se tienen en cuenta los imprevistos durante el proceso.
- Conectividad: Se integran recursos digitales o del entorno físico de forma que expanden el aula más allá de las paredes (uso de datos reales, GPS, redes).
- Agencia y Autogestión: Existe un mecanismo claro para que el docente y el estudiante vean el progreso en tiempo real.
- Flujo de Datos: El estudiante tiene al menos dos opciones de ruta o forma de resolver el problema planteado dentro de la organización.
- Transferencia Situada: La organización obliga a aplicar el conocimiento en un contexto real especialmente crítico.

Por tales razones, con esta investigación se mejora la eficacia didáctica al facilitar un aprendizaje significativo, contextualizado y especializado hacia la Educación para el Cambio Climático. El itinerario didáctico constituye una forma de actuación de probada eficacia, eficiencia y efectividad en varios países, la cual integra varias disciplinas; es escasa su utilización y, por tanto, limita el proceso de formación de los profesores (Aguilera-Morales, 2018).

Esta propuesta fue elaborada y realizada de forma conjunta entre diversas asignaturas del año académico. En la cual se diseña un programa de actividades complementarias con la implementación de itinerarios didácticos virtuales y reales dirigidos a estudiar diferentes espacios geográficos para contribuir a la formación de profesores de biología. Tomando en consideración la educación para el cambio climático y las exigencias de la educación actual para los futuros profesores. La propuesta persigue desarrollar en los estudiantes conocimientos, habilidades y cualidades definidos por el modelo de formación para estos profesores, comunes a todas las asignaturas del año, los cuales son posibles con el estudio de diferentes espacios geográficos, de forma real o virtual.

MATERIALES Y MÉTODOS

La muestra del estudio la constituyen 14 estudiantes de segundo año de la especialidad de profesor de biología para secundaria básica, de la Escuela Pedagógica Manuel Ascunce Domenech, de Santa Clara, Villa Clara, Cuba, como muestra la figura 1. La mayoría de ellas

son mujeres y 6 hombres con diferentes municipios de residencia: Manicaragua 1, Santa Clara 2, Santo Domingo 2, Ranchuelo 2, Placetas 3, Caibarién 1, Quemado de Güines 2, Encrucijada 1, por lo que sus conocimientos del espacio geográfico son variados y sobre su entorno próximo también.

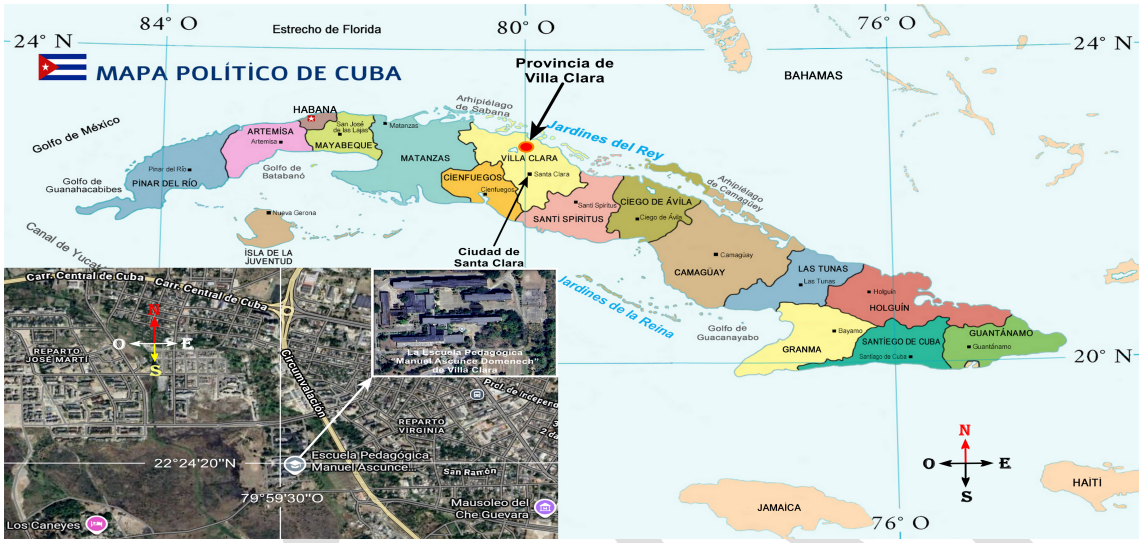


Figura. 1. Localización de la provincia de Villa Clara, Santa Clara e imagen satelital de la Escuela Pedagógica Manuel Ascunce Domenech.

La investigación se diseñó y realizó a lo largo de los cursos académicos 2024-2025 y 2025-2026 e incluyó las asignaturas de Fundamentos de Psicología, Pedagogía, Introducción a la Didáctica y la Práctica Laboral. Se realizó un itinerario didáctico por mes abarcando 4 horas de clase cada semana, diseñado en 4 etapas: preparación, investigación y búsqueda de información, recorrido y conclusiones, utilizando los contenidos de la enseñanza de la biología y su relación con las demás asignaturas en correspondencia con el plan de estudio.

Se aplicaron instrumentos de diagnóstico como: análisis de documentos, observación participante, entrevista en profundidad y triangulación metodológica, que permitieron determinar insuficiencias en:

- Enfoque tradicional y reproductivo: A pesar de dominar la teoría, el aprendizaje es mecánico. No se establecen relaciones de causa-efecto ni se vinculan los contenidos con la vida práctica o el impacto real del cambio climático.
- Insuficiencia en habilidades profesionales: Debilidad en el "enseñar a enseñar". Los estudiantes no saben cómo diseñar sus propios recursos didácticos ni cómo aplicar estrategias de aprendizaje independientes.

- Limitada integración de tecnologías e IA: Aunque los documentos y estudiantes lo piden, el uso de las TIC, los SIG y la Inteligencia Artificial es escaso o inexistente en la práctica docente diaria.
- Desconexión local de la ECC: Existe un bajo nivel de vinculación entre los contenidos biológicos y las problemáticas climáticas específicas de Villa Clara, limitando la capacidad de proponer acciones de resiliencia locales.
- Carencia de metacognición: El proceso de enseñanza se centra en el resultado final. Existen pocos espacios de reflexión sobre "cómo se aprende", lo que impide que el estudiante corrija su propio desempeño.
- Subempleo de los contextos de aprendizaje: Las excursiones y actividades fuera del aula se perciben más como "paseos" que como itinerarios didácticos estructurados con fines pedagógicos y científicos.

Los resultados evidencian las insuficiencias en la formación de los profesores de biología, en los tres ámbitos competenciales: cognitivo, procedimental y actitudinal. Motivo por el cual se realiza el siguiente itinerario didáctico.

Aspectos éticos: La investigación estuvo sujeta a normas éticas que facilitaron comenzar y garantizar el respeto de todos los participantes en el estudio, de manera que se respetaron los criterios/opiniones y derechos individuales de cada uno de ellos, para poder generar nuevos conocimientos sin violar los principios éticos de la confianza y privacidad de la información personal de todos los participantes en la investigación (World Medical Association Declaration of Helsinki, 2024).

RESULTADOS

Se propone realizar el siguiente itinerario didáctico sobre las esferas de la envoltura geográfica, que consta de 4 etapas: preparación, investigación y búsqueda de información, recorrido y conclusiones. Cada etapa presenta la siguiente estructura didáctica: tema, objetivo, introducción, desarrollo, conclusiones y estudio independiente, siguiendo la metodología propuesta por Aguilar-Espinosa *et al*. (2023).

Título: Explorando la Biodiversidad y Resiliencia Climática del entorno local al paisaje global

Etapa 1: La Preparación

Tema: Introducción a la resiliencia socioambiental y la cartografía inteligente del entorno local.

Objetivo: Definir el cambio climático, la resiliencia socioambiental y la metodología de los itinerarios didácticos mediante el uso de herramientas satelitales e IA, contribuyendo a fundamentar la necesidad de la protección de los ecosistemas locales desde su futura labor como profesores de biología.

Introducción

Saludo y control de asistencia.

Organización del aula y la pizarra.

Revisión y control de estudio independiente de la actividad final del mes anterior.

Motivación

El docente inicia el taller con una pregunta problematizadora: *¿Cómo puede un profesor de biología enseñar los efectos del cambio climático global utilizando solo el patio de la escuela o la comunidad circundante?* Se escuchan opiniones y se propone utilizar la metodología de Aguilar-Espinosa *et al*. (2023), se presenta de forma sintética y se explica la definición de Itinerario Didáctico Inteligente

Desarrollo

1. Se realiza una lluvia de ideas digital con los estudiantes, organizados en equipos para utilizar un muro interactivo (como Padlet) para registrar qué manifestaciones del cambio climático perciben en Santa Clara. Se orienta a los estudiantes la introducción en su software de IA un *prompt* específico: *"Actúa como un ecólogo experto en Cuba. ¿Cuáles son las principales amenazas del cambio climático para los matorrales xerófilos sobre serpentina (Cuabal) en la región central y qué conceptos biológicos se evidencian en ellas?"*. Los alumnos contrastan y discuten críticamente las respuestas de la IA y de diferentes software y llegan a conclusiones acerca de las principales amenazas y los software más eficientes para la búsqueda de información.
2. Los estudiantes registran en sus diarios de campo cómo formular preguntas científicas adaptadas al nivel medio básico (secundaria), ensayando la transposición didáctica del contenido que la IA les ofreció. Se elabora un mapa de riesgos locales con sus posibles soluciones desde la educación elaborando otros *prompts* específicos.

Conclusiones

Se realiza una sistematización colectiva donde cada equipo expone sus resultados, define los conceptos clave (p. ej., estrés hídrico, endemismo, resiliencia) y explica cómo se conecta con el cambio climático a nivel local y cómo un profesor de biología puede minimizar estos

problemas a nivel local. Determinar aspectos positivos, negativos e interesantes durante la actividad. Precisar los estudiantes y equipos más destacados.

Estudio Independiente

Cada equipo debe utilizar Google Earth para localizar geográficamente la Escuela Pedagógica "Manuel Ascunce Domenech" y trazar una ruta virtual preliminar hacia el ecosistema del Cuabal de Santa Clara, identificando los cambios en el uso de la tierra observables en las imágenes satelitales de los últimos 10 años.

Etapa 2: La Investigación Y Búsqueda De Información

Tema: Caracterización biológica, ecológica y didáctica de las afectaciones bioclimáticas locales y globales.

Objetivo: Diseñar guías de observación en el terreno sobre la biodiversidad del Cuabal, con la ayuda de la IA generativa mediante la indagación en entornos virtuales y el procesamiento analítico de datos, contribuyendo al desarrollo de habilidades investigativas y pedagógicas.

Introducción

Saludo y control de asistencia.

Organización del aula y la pizarra.

Se realiza el control del estudio independiente: los estudiantes muestran las capturas e interpretaciones de los cambios espaciales en Google Earth, los lugares de Santa Clara donde se aprecia este ecosistema. Se debate sobre las amenazas existentes en ellos y se precisa la necesidad de conectar estas observaciones con la investigación de las especies biológicas que allí habitan.

Desarrollo

Los estudiantes diseñan en equipos las guías de observación científica y las encuestas comunitarias que aplicarán en el terreno con el empleo de la IA para optimizar sus diseños didácticos. Para la revisión se introducen sus propuestas de guías en la IA con la instrucción: *"Revisa esta guía de observación de Biología para estudiantes de secundaria sobre cambio climático. Sugiere tres actividades prácticas y dinámicas que incluyan el uso de dispositivos móviles y que midan la sensibilidad ambiental"*.

Al refinar las guías con las sugerencias de la IA, los estudiantes desarrollan la habilidad profesional de *diseño curricular y planificación del proceso de enseñanza-aprendizaje*.

Conclusiones

Exposición breve (2 minutos por equipo) de las guías de observación finales aprobadas metodológicamente para la salida al campo y explicación de la importancia de esta actividad,

pues la escuela se considera el centro más importante de la comunidad. Determinar aspectos positivos, negativos e interesantes durante la actividad. Precisar los estudiantes y equipos más destacados.

Estudio Independiente

Instalar en sus teléfonos móviles aplicaciones de ciencia ciudadana basadas en IA para el reconocimiento taxonómico (como *iNaturalist* o *Seek*). Realizar una prueba previa fotografiando e identificando tres plantas en las áreas verdes de la escuela.

Etapa 3: El Recorrido

Tema: El paisaje natural y virtual como laboratorio biológico vivo ante el cambio climático.

Objetivo: Valorar los impactos del cambio climático y la actividad antrópica en la biodiversidad del Cuabal *in situ* y virtual, aplicando el método científico y herramientas tecnológicas, para consolidar la responsabilidad ético-profesional del futuro profesor.

Introducción

Saludo y control de asistencia.

En el punto de encuentro (entrada del Cuabal), se realiza la activación ética y metodológica. Se debate la frase martiana sobre la naturaleza como el gran libro abierto y se distribuyen los roles de trabajo científico en el terreno de cada integrante del equipo.

Desarrollo

Los estudiantes recorren el Cuabal aplicando las guías diseñadas. Realizan mediciones biológicas (observación de adaptaciones morfológicas como microfilia, espinescencia) y aplican entrevistas breves a los gestores del área o comunitarios sobre la frecuencia de incendios o sequías. Emplean las aplicaciones *iNaturalist/Seek* (cuyos algoritmos de IA identifican especies en tiempo real mediante visión por computadora). Los datos recopilados se suben a la plataforma para contribuir a la base de datos de biodiversidad global. Paralelamente, usando tabletas o teléfonos, acceden a plataformas virtuales de monitoreo climático global (como *Climate Engine* o simuladores de la NASA) para contrastar cómo el aumento térmico verificado en el Cuabal responde a patrones globales de cambio ambiental. El estudiante asume el rol de guía e instructor científico de sus propios compañeros, entrenando la comunicación pedagógica, el liderazgo y la conducción del aprendizaje en la naturaleza.

Conclusiones

Asamblea de campo donde se realiza un inventario rápido de los hallazgos biológicos del día y se reflexiona sobre los impactos climáticos observados y las propuestas de soluciones a este

problema desde su rol de profesor de biología. Determinar aspectos positivos, negativos e interesantes durante la actividad. Precisar los estudiantes y equipos más destacados.

Estudio Independiente

Organizar y procesar las evidencias fotográficas, grabaciones, registros taxonómicos y notas de campo obtenidos para la preparación del informe integrador y el producto didáctico final.

Etapa 4: Conclusiones

Tema: Socialización del conocimiento bioclimático y evaluación del desempeño de los futuros profesores.

Objetivo: Evaluar el impacto integral del itinerario en el desempeño formativo del futuro profesor, mediante la socialización de productos didácticos innovadores y la triangulación evaluativa, promoviendo la transformación de la realidad escolar.

Introducción

Saludo y control de asistencia.

Organización del aula y la pizarra.

Se realiza el control del estudio independiente en cada equipo y se precisan las potencialidades y dificultades presentadas para la elaboración del informe final.

Se debate acerca de la importancia de la divulgación científica y la educación comunitaria. En la búsqueda de soluciones para los problemas de la localidad. El aula se transforma en un "Simposio Pedagógico sobre Cambio Climático".

Desarrollo

Cada equipo defiende el producto final derivado del itinerario. Estos productos son propuestas didácticas concretas para la secundaria: mapas, videos, maquetas híbridas, portafolios digitales o propuestas de actividades de biología contextualizadas en el Cuabal.

Para la autoevaluación, los estudiantes contrastan sus reflexiones con una matriz de autocrítica pedagógica optimizada por IA. Utilizan la IA para generar rúbricas automatizadas y simuladas que les ayuden a coevaluar los proyectos de sus compañeros de aula.

Se despliega a plenitud la competencia de *evaluación del proceso educativo*. Los estudiantes realizan un ejercicio metacognitivo respondiendo a: *¿Qué saberes biológicos consolidé?, ¿Cómo la tecnología reconfiguró mi forma de enseñar?* y *¿Qué transformaciones éticas experimenté ante el cambio climático?* Se aplica la triangulación mediante la rúbrica analítica analizada en la investigación.

Conclusiones

Se debate sobre los aspectos positivos, negativos e interesantes del itinerario realizado y de sus resultados; se destaca cómo el itinerario demostró el vínculo intersectorial necesario para enfrentar la crisis climática desde la escuela cubana hacia la comunidad. Se seleccionan los estudiantes y equipos más destacados.

Estudio Independiente

Incorporar los recursos didácticos generados en el repositorio digital de la Escuela Pedagógica para que sirvan de banco de medios de enseñanza a los estudiantes que realizan su práctica laboral docente en las escuelas secundarias básicas de Santa Clara. Presentar en eventos y publicar en las redes sociales que más utilizan.

Este diseño curricular por etapas demuestra de forma explícita que la metodología de Aguilar-Espinosa *et al.* (2023) no es una simple salida de campo. Es una estructura didáctica rigurosa donde la IA actúa no como un fin, sino como un medio de enseñanza inteligente y el cambio climático deja de ser teoría para convertirse en el problema profesional que dinamiza el aprendizaje biológico y pedagógico del estudiante.

Para validar la efectividad del itinerario propuesto, se procesaron los datos obtenidos de la *Rúbrica de desempeño* y de los *Diarios de campo* de los participantes. Los resultados de la rúbrica muestran un desplazamiento significativo en la percepción de los docentes sobre la organización de la enseñanza, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados de la rúbrica de desempeño docente.

Dimensión Evaluada	Media Pre-Itinerario (1-5)	Media Post-Itinerario (1-5)	Incremento (%)
Adaptabilidad Dinámica	2,4	4,6	91
Integración de Tecnología (TIC/SIG)	3,1	4,8	54
Transposición Didáctica (ECC)	2,1	4,5	114
Acción del estudiante	2,8	4,7	67

El mayor crecimiento se observó en la *Transposición Didáctica*. Los estudiantes pasaron de una visión teórica del cambio climático a una capacidad de diseño situada en ecosistemas locales, cumpliendo con la "buena práctica" descrita por Aguilar-Espinosa *et al*. (2023).

A través de la técnica de nube de categorías y codificación, se identificaron tres patrones emergentes en los diarios de campo de los futuros profesores:

Los participantes reportaron que la organización inteligente del ID les permitió entender que el espacio físico dicta la secuencia didáctica y no un plan rígido previo.

Cita representativa: "Al usar los sensores en tiempo real, mi planeación cambió; el dato de temperatura nos obligó a buscar otra especie que no teníamos prevista" (Participante 12).

En concordancia con García-Peñalvo (2022**)**, los estudiantes valoraron el uso de SIG y apps no como un "adorno", sino como la única vía para hacer visible lo invisible (el aumento de CO_2 o el estrés hídrico).

La metodología de Aguilar-Espinosa *et al*. *(2023)* fomentó que los estudiantes perdieran el miedo a "no saberlo todo", posicionándose como guías investigadores junto a sus educandos.

DISCUSIÓN

La implementación de los Itinerarios Didácticos Inteligentes (IDI) en la Escuela Pedagógica Manuel Ascunce Domenech de Villa Clara, Cuba demuestra que la articulación sistémica entre la Inteligencia Artificial (IA) generativa, las herramientas de geolocalización y la indagación de campo in situ rompe con la rigidez enciclopedista y reproductiva de la enseñanza tradicional de las ciencias (González-Gaudiano & Meira-Cartea, 2020). Los resultados obtenidos reflejan incrementos significativos en todas las dimensiones competenciales, especialmente en la transposición didáctica de la (ECC), con un 114 % de aumento, y respaldan la tesis de que los entornos híbridos (virtuales y reales) actúan como catalizadores eficaces del aprendizaje desarrollador.

Al contrastar estos datos con lo planteado por Aguilar-Espinosa *et al*. (2023), se confirma que el itinerario didáctico trasciende la noción histórica de la excursión escolar concebida como un mero "paseo" o actividad extraescolar aislada. En su lugar, el IDI se consolida como una forma de organización e instrumento didáctico riguroso que fomenta el pensamiento sistémico en los futuros profesores de biología. La originalidad de la presente propuesta radica en que se diferencia del modelo de itinerario clásico eminentemente geográfico (Martínez-Hernández *et al*., 2021ab), la hibridación inteligente introduce la variable de la adaptabilidad en tiempo real. Como se observó en los diarios de campo analizados, la capacidad de reconfigurar la guía de observación sobre la marcha a partir de alertas climáticas, sensores móviles o el reconocimiento taxonómico automatizado con aplicaciones como *iNaturalist* dota a la práctica de campo de un carácter científico e interactivo directo. Esta flexibilidad en la trayectoria disminuye sustancialmente la brecha histórica entre las teorías macroclimáticas globales presentadas por organismos internacionales (UNESCO, 2024) y la observación de los impactos ecológicos de

carácter antropogénico a escala local, tales como las afectaciones por estrés hídrico y sequías recurrentes en el ecosistema endémico del Cuabal de Santa Clara.

El salto cualitativo registrado en el uso de las tecnologías (de una media inicial de 2,8 a 4,7 puntos en la rúbrica) dialoga directamente con los marcos del conocimiento tecnológico-pedagógico-disciplinar propuestos en la literatura internacional para profesores de ciencias. Los hallazgos de esta investigación coinciden con los de Mnguni *et al*. (2026) en cuanto a que los futuros profesores muestran una elevada receptividad y motivación intrínseca cuando incorporan herramientas de IA y sistemas interactivos a su práctica docente. Sin embargo, este estudio avanza un paso más allá de los diagnósticos perceptivos tradicionales: demuestra de forma empírica que, cuando la alfabetización en IA se introduce a través de un marco instruccional contextualizado, como la formulación guiada de prompts adaptados a la flora xerófila cubana, se mitigan los riesgos de la brecha digital y la dependencia puramente instrumental reportada en estudios críticos recientes (Daher, 2025). La tecnología, por lo tanto, no opera como un "adorno digital", sino como un mediador cognitivo crítico indispensable (García-Peñalvo, 2022) que permite hacer visibles fenómenos bioclimáticos invisibles a simple vista, tales como los balances dinámicos de carbono o los patrones macroevolutivos de resiliencia frente a las variaciones térmicas.

Desde una perspectiva pedagógica e institucional, el empoderamiento y la acción alcanzados por los estudiantes de segundo año (incremento del 67 % en autonomía) reconfiguran radicalmente la relación asimétrica clásica del proceso de enseñanza-aprendizaje. En concordancia con los modelos de "clase inteligente" (Cantos-Macias *et al*., 2025), el profesor de la Escuela Pedagógica deja de ser el único depositario y transmisor de la información científica para asumir el rol de arquitecto y curador de ecosistemas complejos de aprendizaje. Los estudiantes, al verse obligados a alternar rutas lógicas de resolución de problemas en el terreno y al ejercer como instructores de sus propios compañeros de aula, ensayan de forma directa la competencia de conducción del aprendizaje en la naturaleza. Este fenómeno de transposición situada es fundamental en la formación docente de nivel medio básico (Lopera-Pérez & Villagrá-Sobrino, 2020), ya que prepara a los estudiantes de las Escuelas Pedagógicas para transferir estos mismos recursos metodológicos disruptivos y creativos a sus futuras prácticas laborales docentes en las escuelas secundarias básicas del territorio.

Finalmente, el hecho de que la dimensión de "Responsabilidad y Ética Profesional" haya obtenido la puntuación media más alta tras la intervención (4.9 puntos) es un indicador de la profunda transformación actitudinal y valorativa que provoca el aprendizaje situado. La educación para el cambio climático no puede limitarse a la descripción conceptual cuantitativa

de gases de efecto invernadero; exige el desarrollo de una conciencia y justicia ambiental crítica basada en las vivencias ecológicas locales (Zamora Hernández *et al*., 2025). Al conectar los contenidos curriculares de la asignatura Biología con las directrices gubernamentales cubanas del Plan del Estado para el Enfrentamiento al Cambio Climático (Tarea Vida), los itinerarios didácticos inteligentes dotan de un sentido de urgencia social e histórica a la profesión docente (MECCE Project & UNESCO, 2024). Los futuros egresados no solo asimilan habilidades procedimentales para el laboratorio o el aula contemporánea, sino que consolidan una ética del cuidado planetario orientada a la acción colectiva y a la resiliencia socioambiental comunitaria, cumpliendo con los estándares de calidad globales que demanda la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, como se evidencia en la figura 2.

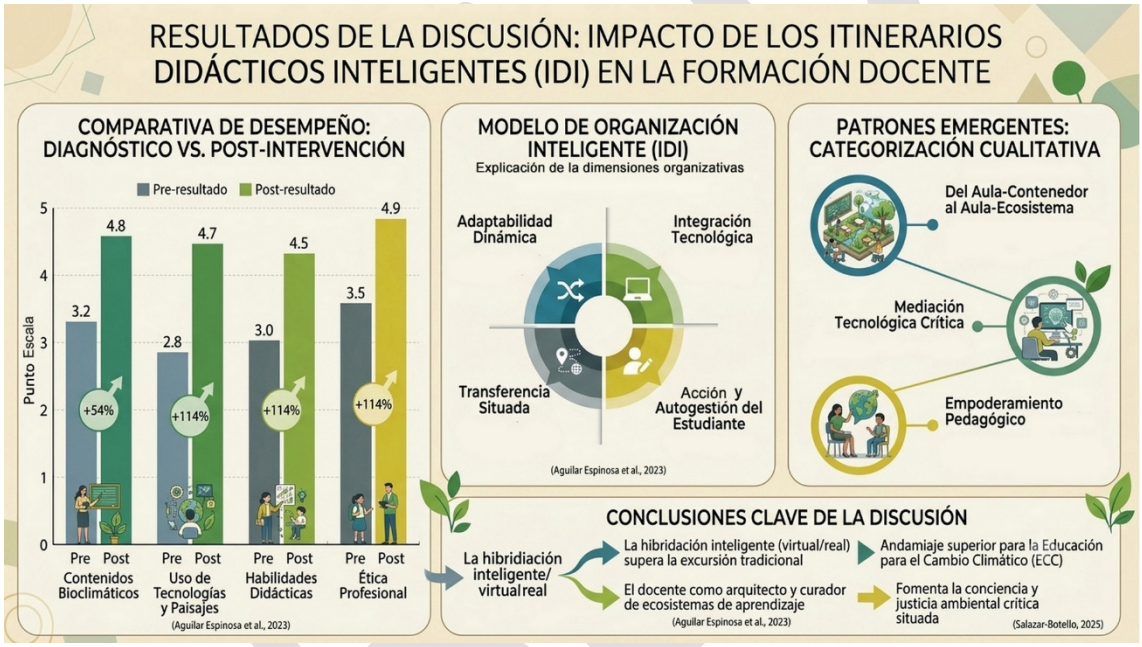


Figura 2. Resultados de la discusión antes y después de aplicar los Itinerarios Didácticos Inteligentes.

En resumen, la organización inteligente del itinerario permitió que los futuros profesores no solo aprendieran biología, sino que diseñaran soluciones educativas. Se confirma que la flexibilidad en los itinerarios reduce la brecha entre la teoría académica y la práctica de campo. La inteligencia del sistema residió en la capacidad de ajustar el guion metodológico en tiempo real basado en los hallazgos bióticos encontrados.

Se concluye que los itinerarios didácticos inteligentes son herramientas esenciales en la formación docente para el siglo XXI. Estos promueven una alfabetización climática que es a la vez técnica y humanística, cumpliendo con los estándares de calidad que demanda el área de innovación educativa. Además, la investigación permite que la transición hacia una

organización inteligente de la enseñanza sea una condición para abordar la Educación para el Cambio Climático (ECC) en la formación de profesores de biología.

Se confirma que los itinerarios diseñados bajo la metodología de Aguilar-Espinosa *et al.* (2023) superan las limitaciones de la excursión tradicional, transformándola en un laboratorio de datos en tiempo real que fomenta la alfabetización científica.

La "inteligencia" de la organización no reside en el uso masivo de tecnología, sino en la capacidad de integrar datos digitales (SIG, sensores) con la observación fenomenológica situada, permitiendo que el estudiante desarrolle una visión sistémica de los biomas en crisis.

La implementación de esta buena práctica ha demostrado que, cuando el estudiante asume el rol de investigador en un entorno flexible, su capacidad de transposición didáctica aumenta significativamente, preparándolo para gestionar la incertidumbre climática en sus futuras aulas.

Author contributions: **CRediT (Contributor Roles Taxonomy)**

ARH = Adrián Ruiz-Hernández

OAE = Oliday Aguilar-Espinosa

JI = Jose Iannacone

RAG = Rafael Arminana-García

DS = Denis Simard

Conceptualization: ARH, OAE, JI, RAG, DS

Data curation: ARH, OAE, JI, RAG, DS

Formal Analysis: ARH, OAE, JI, RAG, DS

Funding acquisition: ARH

Investigation: ARH, OAE, JI, RAG, DS

Methodology: ARH, OAE, JI, RAG, DS

Project administration: OAE, RAG

Resources: OAE, RAG

Software: DS, ARH, OAE, JI, RAG

Supervision: OAE, RAG, JI

Validation: JI

Visualization: JI

Writing – original draft: ARH, OAE, JI, RAG, DS

Writing – review & editing: ARH, OAE, JI, RAG, DS

ASAP

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilar-Espinosa, O., Rodríguez Vallejo, E., Armiñana García, R., & Padilla Gómez, A. (2023). Un itinerario didáctico, buenas prácticas para la formación de profesores de geografía. *Conrado*, *19*, 320-331.

Aguilera-Morales, D. (2018). La salida de campo como recurso didáctico para enseñar ciencia. Una revisión sistemática. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de la Ciencia*, *15*, 3103.

Adelana, O. P., Ayanwale, M. A., & Sanusi, I. T. (2024). Exploring pre-service biology teachers' intention to teach genetics using an AI intelligent tutoring-based system. *Cogent Education*, *11*, 2310976.

Ajibike, F. (2025). AI-enhanced skill development: Leveraging AI in biology education to develop skills in digital era. *Journal of Educational Studies Trends and Practice, 8*, 144-152.

Álvarez-Saiz, E., Reyes-Ruiz, C.M., Herrero-Martínez, M. T., & Pérez-Carabaza, S. (2023). *Itinerarios formativos para un aprendizaje personalizado. VII Congreso Internacional sobre Aprendizaje, Innovación y Cooperación*. https//zaguan.unizar.es

Arias-Valle, M.B., & Marimon, F. (2025). Evolution of Latin American higher education institution commitment to the 2030 Agenda. *Journal of Teacher Education for Sustainability, 27*, 115-134.

Asian Centre for Teacher Education for Sustainable Development. (2024). *Asian framework of teacher education for climate action* (Versiones 1 y 2). https://learning.teachforall.org/profile/asian-framework-teacher-education-climate-action

Cantos-Macias, A. M., Cantos-Macias, M.A., Buitrón-Nieto, E. X., Maza-Vivanco, D.B., & Guamán-Segarra (2025). La inteligencia artificial en la formación docente: Implicaciones para las competencias. La transformación pedagógica. *Revista Tse´de, 8*, 1-41.

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático [CMNUCC]. (1992). *Definición y bases de la variabilidad climática global*. ONU.

Daher, R. (2025). Integrating AI literacy into teacher education: A critical perspective paper. *Discover Artificial Intelligence*, *5*, 217.

Fernández, R. (2019). *La enseñanza del paisaje desde una concepción constructivista: propuesta didáctica*. *Dedica Revista Educação e Humanidades*, *15*, 135-159.

Kazmaci, A., Cek, K., Altinay, F., Altinay, Z., & Dagli, G. (2025). Influence of theoretical and practical artificial intelligence knowledge on the primary school teachers' sustainable AI

integration ability: mediating effects of beliefs and attitudes. *Frontiers in Psychology, 16,* 1628557.

García-Peñalvo, F. J. (2022). *Ecosistemas tecnológicos de aprendizaje*. Ediciones Pirámide.

González-Gaudiano, E. J., & Meira-Cartea, P. Á. (2020). Educación para el cambio climático: ¿educar sobre el clima o para el cambio? *Perfiles Educativos*, *42*, 157–174.

Guterres, A. (2021). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Naciones Unidas.

Lopera-Pérez, M., & Villagrá-Sobrino, S. L. (2020). Alfabetización climática en la formación inicial y continua de docentes. *Uni-pluriversidad*, *20*, e2020104.

Martínez, D. (2017). Profesorado en formación y ambientes educativos virtuales. *Campus Virtuales*, *6*, 69-78.

Martínez-Hernández, C., Cifo-Izquierdo, M., Farinós-Celdrán, P., & Robles-Moral, F. (2021a). Salida a un espacio natural para desarrollar competencias interdisciplinares de maestros en formación. *Revista Interuniversitaria de Formación del Profesorado*, *96*, 225-246.

Martínez-Hernández, C., Yubero, C., & Robles Moral, F. J. (2021b). Itinerario didáctico multidisciplinar en Madrid: validación con maestros en formación. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, *23*, e22.

MECCE Project & UNESCO. (2024). *Country profile: Cuba. Climate change communication and education*. Monitoring and Evaluating Climate Communication and Education Project. https://www.mecce.net/country-profile/cuba

Mnguni, L., R. El Islami, A.Z., Nuangchalerm, P., Sethole, K., Sari, I.J., Camara, J.S., & Van Bien, N. (2026). AI training and science student teachers' TPACK in campus-based and distance education: a comparative study. *Computers and Education Open, 11*, 100410.

Mur, J.A., Magallanes-Trejo, M. L., Nonino, S. N., Deza, R., Yapur, J., & Pereyra Girardi, C. I. (2025). Inteligencia artificial y pensamiento crítico: tensiones y desafíos en la formación universitaria. *Revista de Psicología y Psicopedagogía, 10*, https://p3.usal.edu.ar/index.php/psicol/article/view/7523/9996

Ortega-Chinchilla, M.J., Contreras-García, J., Bonilla-Martos, A.L., & Arroyo-Sánchez, D.J.M. (2023). Los itinerarios didácticos en el panorama científico español. *Revista UNES. Universidad, Escuela y Sociedad, 14*, 26-40.

Palazón-Carrión, P., & Serrano-Sánchez, J.L. (2025). Itinerarios flexibles de aprendizaje para el desarrollo de la competencia de aprender a aprender. *REIDOCREA, 14*, 551-562.

Panda, P., Satpathy, S. P., Pattanayak, S., & Patnaik, D**.** (2024). Examining the effects of AI-powered language learning systems on young learners' linguistic development. *Educational Administration: Theory and Practice, 30*, 3028–3035.

The MECCE Project. (2024). *Country profile: Cuba. Climate change communication and education*. Monitoring and Evaluating Climate Communication and Education Project / UNESCO. https://www.mecce.net/country-profile/cuba

UNESCO. (2024). *Education for climate change action: Changing minds, changing hearts*. UNESCO Publishing.

UNESCO. (2025a). *Marco de competencias para docentes en materia de inteligencia artificial*. https://www.unesco.org/es/articles/marco-de-competencias-para-docentes-en-materia-de-ia

UNESCO. (2025b). *UNESCO strengthens education for sustainable development in Cuba through technical support to the education sector*. UNESCO.

Valenzuela-Santoyo, A. C., Reynoso-González, O.U., & Portillo Peñuelas, S. A. (2023). Competencias autopercibidas docentes y enfoques de enseñanza en educación primaria. *Revista de Investigación Educativa de la REDIECH, 14*, https://www.redalyc.org/journal/5216/521674411011/html/

Vélez-Vélez, J.J. (2021). Organización inteligente y su relación con la gestión pedagógica en la Unidad Educativa Juan Montalvo, Buena Fe, Ecuador. *Revista Hacedor-AIAPAEC, 5*, 93-106.

World Medical Association Declaration of Helsinki (2024). WMA Declaration of Helsinki – Ethical Principles for Medical Research Involving Human Participants. https://www.wma.net/policies-post/wma-declaration-of-helsinki

Zamora-Hernández, O. L., Mantecón-Licea, S. & Ruiz-Jerez, Y. Y. (2025). Educación ambiental y cambio climático un desafía para la Escuela primaria cubana. *Revista Didáctica y Educación, 16*, 111–135.

Received July 20, 2026.

Accepted October 29, 2026.

Published online October 30, 2026.