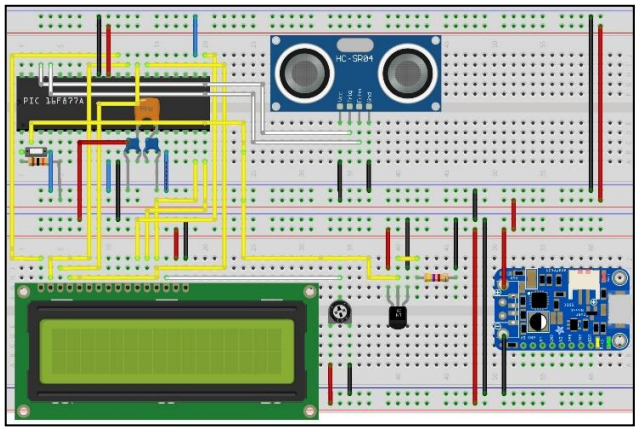
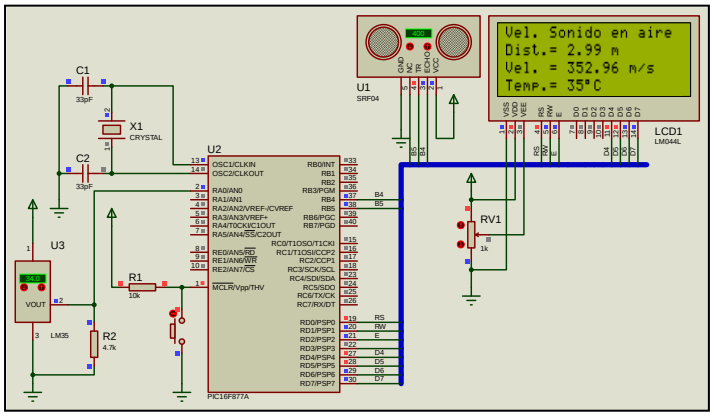
ISSN 1870-9095

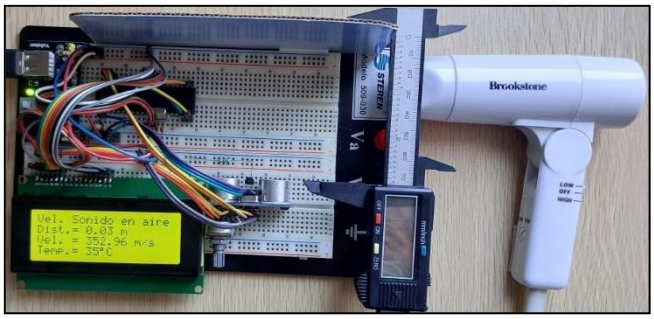
LATIN AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS EDUCATION

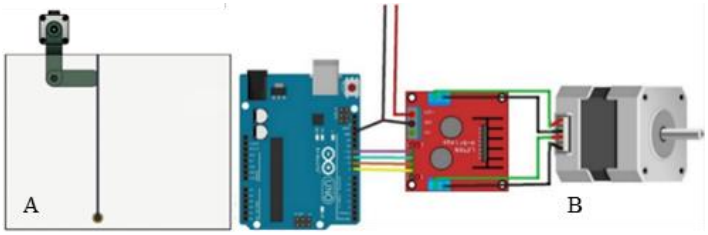
www.lajpe.org

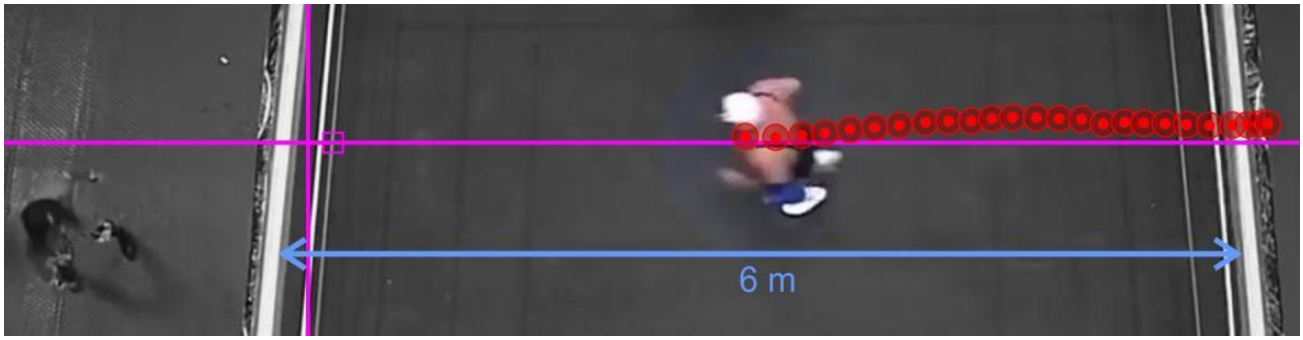
Volume 19 Supplement 1 September 2025











A publication sponsored by the Latin American Physics Education Network
and the Institute of Science Education

LATIN AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS EDUCATION

Electronic version of this journal can be downloaded free of charge from the web-resource:
http://www.lajpe.org

Production and technical support
R. Bourbaki
r.bourbaki@gmail.com

Latin American Journal of Physics Education is indexed in:

EDITORIAL POLICY

Latin American Journal of Physics Education (LAJPE) is a peer-reviewed, electronic international journal for the publication of papers of instructional and cultural aspects of physics. Articles are chosen to support those involved with physics courses from introductory up to postgraduate levels.

Papers may be comprehensive reviews or reports of original investigations that make a definitive contribution to existing knowledge. The content must not have been published or accepted for publication elsewhere, and papers must not be under consideration by another journal.

This journal is published quarterly (March, June, September and December), by the Latin American Physics Education Network (LAPEN) and the Institute of Science Education. Manuscripts should be submitted to boubarkic@gmail.com or lajpe@lapen.org.mx. Further information is provided in the "Instructions to Authors" on www.lajpe.org

Direct inquiries on editorial policy and the review process to: César Mora and C. Bourbaki, Editors in Chief, Instituto Pedagógico Latinoamericano y Caribeño (Cuba), calle 154 No. 12906 entre 129 y 133 Reparto Reynold Garcia, Matanzas, Cuba CP 40100. Phone: 53 45 265794

ISSN 1870-9095

Copyright © 2025 *Latin American Physics Education Network.* (www.lajpe.org)

INTERNATIONAL ADVISORY COMMITTEE

Ann-Marie Pendrill, Göteborgs University (Swenden)
Bayram Akarsu, Erciyes University (Turkey)
Carl Wenning, Illinois State University (USA)
Diane Grayson, Andromeda Science Education (South Africa)
David Sokoloff, University of Oregon (USA)
Dean Zollman, Kansas State University (USA)
Freidrich Herrmann, University of Karlsruhe (Germany)
Hiroshi Kawakatsu, Kagawa University (Japan)
Jorge Barojas Weber, Universidad Nacional Autónoma de México (México)
Laurence Viennot, Université Paris 7 (France)
Marisa Michelini, University of Udine (Italy)
Marco Antonio Moreira, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Brazil)
Minella Alarcón, UNESCO (France)
Orhan Karamustafaoğlu, Amasya University, (Turkey)
Pratibha Jolly, University of Delhi (India)
Ton Ellermeijer, (Netherlands)
Verónica Tricio, University of Burgos (Spain)
Vivien Talisayon, University of the Philippines (Philippines)

EDITORIAL BOARD
Deise Miranda, Universidade Federal do Rio de Janeiro (Brasil)
Eduardo Moltó, Instituto Superior Pedagógico José Varona (Cuba)
Eduardo Montero, Escuela Superior Politécnica del Litoral (Ecuador)
Josefina Barrera, Universidade do Estado do Amazonas (Brasil)
Julio Benegas, Universidad Nacional de San Luis (Argentina)
Leda Roldán, Universidad de Costa Rica (Costa Rica)
Celso Ladera, Universidad Simón Bolivar (Venezuela)
Nelson Arias Ávila, Universidad Distrital, Bogotá (Colombia)
Octavio Calzadilla, Universidad de la Habana (Cuba)
Ricardo Buzzo Garrao, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (Chile)
Zulma Gangoso, Universidad Nacional de Córdoba (Argentina)

EDITOR-IN-CHIEF
César Mora, Instituto Politécnico Nacional (México)

ASSOCIATED EDITOR
Josip Slisko, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (México)
Carlos Bourbaki, Instituto Pedagógico Latinoamericano y Caribeño (Cuba)

INVITED EDITOR
Vicente Torres, Universidad Nacional Autónoma de México (México)

LATIN AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS EDUCATION
Volume 19, Supplement 1, September 2025

CONTENTS/CONTENIDO

Papers/Artículos

Sociocultural Contexts in STEAM Education and Science Communication
Jesús M. Sáenz, Karen Y. Castrejón 1301S

Explorando la física de los rompeolas: un experimento didáctico para comprender la disipación de las olas
Alan Arias, Antonio Horta-Rangel, Jorge Noriega, Norma Gutiérrez, MH Ramírez 1302S

Uso de laboratorios STEAM como indicador en el aumento del índice de aprobación
en los cursos de física para el nivel medio superior
Andres González García, Luis David Valadez Ponce, Gerardo Valadez Ponce, José Emigdio Frausto Macías, Víctor Hernández Briseño, Belem Michelle Hernández Arriaga 1303S

Video análisis y parámetros físicos de carrera en luchadores profesionales antes de lanzarse del ring
Vicente Torres Zúñiga 1304S

El problema del potencial eléctrico para una caja cuadrada finita
Andrés González García, Beatriz Rubio Campos, Gerardo González García, Juan J Rosales García 1305S

Optics Learning Beyond the Classroom: Non-Formal STEM Strategies for Rural Students
Emma Vianey García Ramírez, Patricia Mendoza-Mendez, Carmen del Pilar Suárez Rodríguez 1306S

Sociocultural Contexts in STEAM Education and Science Communication

ISSN 1870-9095

Jesús M. Sáenz[1,2], Karen Y. Castrejón[1]
[1]*Departamento de Física y Matemáticas, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Av. del Charro No.450. Colonia Partido Romero, CP 32310, Ciudad Juárez, México.*
[2]*Department of Physics, New Mexico State University, MSC 3D 1255 N Horseshoe 88003-8001, Las Cruces, New Mexico, U.S.A.*

E-mail: jessaenz@uacj.mx

(Recibido el 28 mayo de 2025, aceptado el 3 de julio de 2025)

Abstract

This review examines how sociocultural contexts impact the integration of science communication into STEM and STEAM education, particularly in Latin America, where inequities and cultural diversity present distinct challenges. Through a narrative synthesis of examples, case studies, and best practices, the review highlights themes such as science identity, self-efficacy, civic engagement, inclusion, educational technologies, and translanguaging. Findings suggest that culturally responsive approaches enhance motivation and meaningful learning in STEM fields. Achieving this requires collaboration among educators, science communicators, and communities, supported by adequate policies and critical evaluation of educational initiatives and activities.

Keywords: STEM education, Science Communication, Sociocultural Context.

Resumen

Esta revisión examina cómo los contextos socioculturales impactan la integración de la comunicación científica en la educación STEM y STEAM, particularmente en América Latina, donde las inequidades y la diversidad cultural presentan desafíos distintivos. Mediante una síntesis narrativa de ejemplos, estudios de caso y buenas prácticas, la revisión destaca temas como la identidad científica, la autoeficacia, la participación cívica, la inclusión, las tecnologías educativas y el translenguaje. Los hallazgos sugieren que los enfoques culturalmente receptivos mejoran la motivación y el aprendizaje significativo en las áreas STEM. Lograr esto requiere la colaboración entre educadores, comunicadores científicos y comunidades, respaldada por políticas adecuadas y una evaluación crítica de las iniciativas y actividades educativas.

Palabras clave: Educación STEM, Comunicación científica, Contexto sociocultural.

I. INTRODUCTION

In [1], science communication is described as encompassing a wide range of modes that target different audiences, each with specific objectives, all aimed at raising awareness of scientific topics. One traditional approach is the “deficit” or “one-way” model, which assumes a need to fill knowledge gaps. As discussed in [2], this traditional model has been criticized for potentially reinforcing power dynamics. An alternative is the “two-way” model. Llorente [3] presents the three basic models of science communication: dissemination, dialogue, and conversation-participation.

Just as science communication practices must consider audiences’ prior knowledge, values, and perspectives, educational practices in STEM must also acknowledge students’ diverse cultural and social backgrounds.

For example, Vera [4] states that education encompasses various dimensions of student development, including social, cultural, economic, and environmental aspects. Although the study refers specifically to Ecuador, this perspective on education has become increasingly widespread. For example, Benitez [5] discussed the effectiveness of culturally responsible, family-centered STEM interventions among underrepresented groups, such as Latina girls. As noted in [6], there has been rapid growth in STEAM education research – particularly regarding gender- and most of the studies reviewed reveal gender inequality in STEM disciplines. However, many of these studies overlook the social, cultural, and institutional barriers that contribute to gender gaps in representation [6]. This argument supports our advocacy for integrating science communication, sociocultural contexts, and STEAM education.

Following the communicative nature of education, teaching is defined as “a specific form of communication that aims to provide students with the opportunity to learn and construct knowledge” [4, p.2]. The same work asserts that “education should be a liberating process that allows students to reflect on their sociocultural reality” [4, p.8]. Additionally, the work in [7] explains that approaches based on sociocultural theory view learning as “a social process involving cultural tools like language to construct knowledge” [7, p. 1]. As an example, the work presented in [5] explores culturally rooted pedagogy through a case study of STEM teachers at an all-girls STEAM school (predominantly Latina)

in the U.S.-Mexico borderlands. These teachers integrate engineering to reinforce core subjects while supporting students' academic and personal growth.

The work presented in [8] notes that children's emotional understanding is a predictor of psychological well-being and academic achievement. The study emphasizes the importance of addressing individual learning needs, such as learning styles and abilities, to foster inclusive and engaging environments that respect and support each student, regardless of their cultural background.

The reduction of potential exclusionary barriers in implementing advanced pedagogical strategies is discussed in [9]. The work also notes the scarcity of studies that implement digital tools while considering students' sociocultural profiles, particularly among ethnic minorities and underrepresented or vulnerable groups. Science communication is vital in addressing this issue. As shown in [10], individuals from low-income and marginalized backgrounds often have limited exposure to science communication activities. In contrast, science communication training has been shown to increase science identity– which refers to students' self-perceived belonging and competence within scientific disciplines– and self-efficacy – defined as a combination of a student's perceived ability to conduct research, solve problems, and communicate effectively [11]- among STEM students [10].

This review examines how integrating science communication into STEAM education, when informed by sociocultural context, can enhance inclusion, engagement, and effectiveness in diverse learning environments.

II. THEORETICAL FRAMEWORK

To understand how sociocultural learning translates into educational practice, we first define essential terms in STEM and STEAM education. Kotsis [8] defines STEM education as a multipronged approach that integrates science, technology, engineering, and mathematics while fostering creativity alongside scientific and mathematical competencies. The inclusion of the arts in STEM is known as STEAM. Pedrosa [6] argues that incorporating the arts allows students to express creativity and expand their perspectives in traditionally rigid or logical fields. According to [6], the arts help contextualize science and can make STEM subjects more appealing to a broader range of students.

As reported in [12], culturally relevant STEM education focuses on serving students who are culturally, linguistically, and socially diverse. As stated in [7] and [12], Vygotsky's sociocultural theory posits that learning is inherently social and mediated by cultural tools and artifacts, with language serving as the primary mediator. The authors of that work provide a systematic review of the Culturo-Techno-Contextual Approach- an Afrocentric, decolonizing framework in STEAM education that incorporates African cultural knowledge. This approach integrates students' cultural backgrounds, technological tools, and geographical contexts. Oladejo [12] reports that the strategy is effective in STEM learning due to its ability to incorporate student knowledge into cultural practices and daily life, enhance critical thinking, and promote student interest in STEM topics.

Kotsis [8] highlights the difference between general education, which focuses on literacy, mathematics, and social development, and STEM education, which emphasizes the critical and technical skills needed by future professionals. However, as noted in [6], there is no consensus on how STEM education should be implemented. As discussed in [6], there are several approaches for achieving disciplinary integration in STEAM:

- Multidisciplinary: Disciplines remain distinct but are applied together to solve a problem.
- Interdisciplinary: Disciplines are approached separately, then intentionally combined.
- Transdisciplinary: Disciplines are integrated seamlessly to solve problems holistically.

These frameworks provide the conceptual foundation for analyzing how science communication and STEAM education can address the diverse needs of learners.

III. STEAM EDUCATION IN DIVERSE SOCIOCULTURAL CONTEXTS

Certain STEM approaches in education have drawn criticism. Andrade [13] notes that they often lack sociopolitical context, overlooking the social, ethical, political, and environmental dimensions that intersect with science and technology. The work advocates for the Science, Technology, and Society (STS) education framework as a more socially engaged alternative to STEM. However, it does not address the strengths or evolution of STEM education itself. Based on the discussions in this review, it will become evident that STEM education is evolving toward a more critical, inclusive, and socially engaged vision.

Kotsis [8] identifies several barriers to meaningful STEM education: limited resources, insufficient teacher training, and weak support systems. For example, Bhagwati [14] emphasizes the importance of teacher resources, professional training, interdisciplinary curriculum development, and technology integration in supporting effective learning.

Seidel [15] notes that underrepresented communities lack access to high-quality and culturally relevant STEM learning opportunities. Similarly, Bhagwati [14] emphasizes the absence of culturally responsive teaching and the failure to recognize students' prior knowledge as essential challenges.

Kotsis [8] highlights the persistent gender gap in STEM, with girls and women remaining underrepresented in the field. The study notes that although girls often show early interest in STEM, that interest tends to decline throughout their educational journey. In this context, Zhou [16] addressed the multifaceted decline in interest in STEM careers. Factors such as gender, ethnicity, self-motivation (including interest, enjoyment, and social utility), social persuasion, self-efficacy, personal utility (e.g., job stability), and positive STEM experiences are identified as primary influences on STEM career choices. The roles of social utility and persuasion underscore the importance of sociocultural context in STEAM

education, mainly as students increasingly express concerns about environmental and social issues [16].

Kotsis [8] also attributes the gender gap to the influence of social groups and cultural expectations. Similarly, Benedito [17] reports that societal biases around gendered behaviors and skills reinforce stereotypes from early childhood. The study encompasses an in-depth review of Latin American public policies addressing gender inequality in STEM fields. In contrast, Dou [18] emphasizes the positive role of family context in shaping children's STEM identity, including interest, recognition, and self-perception of performance, through everyday conversations about STEM and related topics. These positive outcomes suggest opportunities for science communication to engage families by incorporating cultural, emotional, and narrative forms that stimulate discussion.

Science identity refers to how students perceive themselves as capable and actual participants in science communities. As mentioned in [11] and [19], undergraduate science identity can predict engagement in STEM communities but does not necessarily correlate with self-efficacy or communication skills. Furthermore, these studies reveal a disconnect between science identity and civic engagement, which refers to the application of scientific knowledge and skills to promote public welfare, influence policy, and participate in community-based problem-solving, suggesting that science training does not always prepare students to become social leaders or promote equity. These findings underscore the importance of science communication in shaping students' identities.

Regarding educational design, such as with metaverses—3D immersive virtual environments used for interactive learning—Avendaño [9] recommends beginning with an understanding of how factors like ethnicity, socioeconomic status, gender, and functional diversity influence student engagement and experience. Science literacy is essential for making informed decisions, understanding diverse perspectives, and constructing evidence-based arguments, which are core elements of effective science communication. Benedito [17] also finds that public policies supporting gender balance in science education can encourage interest and motivation, especially when introduced from early childhood.

To guide culturally responsive instruction, Ganesan [7] offers several strategies, which include:

- Leveraging linguistic resources: Translanguaging draws on the full range of students' languages, allowing them to use their home languages alongside academic and scientific terms to construct meaning and deepen understanding.
- Culturally responsive pedagogy: Linking science content to students' cultural experiences.
- Integrating scientific content and language instruction: Emphasizing concurrent learning of scientific content and language for multilingual students.
- Technology-enhanced learning: Using tools like digital storytelling to engage learners.
- 5E Instructional Model: Engage (connect to prior and cultural knowledge), Explore (hands-on collaboration), Explain (student-led understanding), Elaborate (apply concepts to new situations), Evaluate (assess understanding with multiple modes).

Ganesan [7] emphasizes that the success of culturally sustainable approaches relies on designing learning experiences that are responsive to diverse cultural contexts.

Together, the findings so far presented in the review reveal that without attention to sociocultural context, STEAM education risks perpetuating existing inequalities. The following section explores how science communication may help address this challenge.

IV. SCIENCE COMMUNICATION AS AN EDUCATION TOOL

According to [1], science communication, through its various modes, serves to raise awareness of science topics among specific target audiences. When the audience consists of students, science communication serves as an educational tool. The authors propose that science communication and science education are "two sides of the same coin" [1, p. 6].

One major challenge in science communication is the lack of consistent evaluation criteria across activities, which creates uncertainty about their success [3]. Ziegler [20] outlines three critical challenges in evaluating science communication: (1) vague definitions of objectives and target audiences, (2) relying on self-reporting rather than scientifically valid evaluations, and (3) viewing evaluation as a final step instead of an ongoing learning process in the activity design and implementation. These limitations should be addressed when using science communication as an educational tool.

The literature review presented in [16] highlights the importance of improving STEAM education while noting the limitations of science communication: "…classroom interventions such as museum visits and involvement in citizen science projects … do not have a very strong influence on STEM career choice but seem to enhance rather than influence aspirations outright" [16, p. 18].

Lorke [21] proposes that science communication activities be classified by their objectives: increasing access to science, influencing audience response, encouraging action, promoting dialogue with the scientific community, or fostering participation in science.

Science communication is increasingly adopting organizational structures. For example, Krebs [22] suggests that defining participant roles, audience types, and objectives can optimize science communication efforts. Such structures may also be applied in the classroom by aligning educational goals with science communication objectives. These experiences can extend into informal STEM education, which includes activities centered on STEM engagement outside the formal classroom [23]. Examples include after-school programs, presentations, science festivals, museum and planetarium visits, social media, popular books, games, and films [23].

Moving on to science communication channels that can be used with students or general audiences, del Cerro-Sánchez [24] identifies gamification, utilizing digital and board games,

role-playing, and simulations, as an effective science communication tool to promote science literacy, facilitate interactive discussions, and support hands-on experimentation. The authors argue that success requires planning, clearly defined objectives, effective use of technology, and opportunities for collaboration and feedback. These elements reflect core principles of strategic science communication. In this approach, games are viewed as tools that educators and science communicators can utilize in both formal and informal settings to introduce STEM concepts.

Andrade [13] notes the increasing dissemination of STEM approaches through various channels, including events, academic journals, educational websites, articles, dissertations, and theses. These are just a few of the many communication channels (e.g., blogs, social media, influencers, videos) used in science communication, although they can be considered professional channels.

Dou [18] observes that socialization in both formal and informal learning contexts shapes stereotypes and archetypes of STEM professionals, often in contrast with students' perceptions of their own STEM identities. In this context, science communication is increasingly seen as an interdisciplinary collaboration among educators, pedagogues, public engagement professionals, and STEM experts to create supportive learning environments [2, 25].

Seidel [15] highlights digital storytelling, used in both formal and informal settings, as a valuable educational tool for enhancing student engagement, achievement, and motivation. Digital storytelling is defined as the use of video and digital media to communicate science through short, research-based narratives.

Ulbrich [26] argues that technologies such as 3D modeling and printing can enhance creativity, critical thinking, collaboration, and communication in STEAM education, thereby helping to bridge gender gaps. This underscores the teacher's role as a science communicator, who is required to explain content using innovative digital tools.

Table I shows initiatives that illustrate how science communication strategies have been applied in public-facing physics education:

TABLE I. Summary table of example science communication initiatives in physics.

Initiative	*Key Features*
ATLAS Collaboration [27]	Outreach activities, multilingual materials, virtual visits, high-energy physics tutorials.
CERN Science Gateway [28]	Collaborative outreach center with scientists, educators, designers, and multimedia experts.
Stanford Underground Research Facility [29]	Educational programs, teacher training, Artist in Residence program focused on neutrino and astroparticle physics.
Italian Institute of Nuclear Physics [30, 31]	Narrative storytelling, social media, and workshops for children on atomic structure and cosmology.
MAGIC Collaboration [32]	Social media recognition of young scientists, public lectures, masterclasses, and telescope site tours.
Educational YouTube Channels [33]	Topics include energy, electricity, sustainability; accessible digital format.
Webb Outreach Through Art [34]	Artistic interpretation of James Webb telescope images to engage the public.
Do You Speak Quantum? [35]	Interactive exhibition to raise public and policymaker awareness of quantum physics and computing.

Together, these approaches underscore that science communication—when designed to engage and include—can enhance formal education, potentially increasing participation in STEM fields.

V. INTERSECTION OF STEAM EDUCATION, SCIENCE COMMUNICATION, AND SOCIOCULTURAL CONTEXT

This section synthesizes the theoretical and empirical insights discussed above to show how science communication, STEAM, and sociocultural context, featuring intersect in practice.

The work presented in [13] highlights a tension in curricula proposals aimed at fostering citizenship, social participation, and transformation, "contrasted with the pragmatic, economistic, and market-oriented perspective typical of STEM projects" [13, p. 1]. STEM's original purpose, introduced in the United States three decades ago, was "to promote a skilled workforce in the areas of Science, Technology, Engineering and Mathematics" [6, p.188]. The review does not adopt this dichotomy. Instead, it presents ample evidence that STEM education and science communication can be implemented with attention to sociocultural context. However, more research is needed to critically assess the effectiveness of STEM approaches compared to traditional teaching methods.

The effective implementation of STEAM education and science communication depends mainly on educators. As Kotsis [8] notes, educators function not only as instructors but also as mentors and role models. This expanded role requires awareness of students' diverse needs and backgrounds, often addressed through strategies like differentiated instruction—tailoring content, teaching methods, and assessments to individual strengths and contexts.

As discussed, del Cerro-Sánchez [24] offers an example of the intersection of STEM education, science communication, and sociocultural awareness: an outreach program in rural Latin American communities that incorporates local dialects and cultural contexts. Science communication about STEM concepts, including microbiology and climate, was enacted through talks, inquiry-based activities, and hands-on experiences to enhance reasoning, critical thinking, and collaborative learning, promoting civic awareness and science literacy by relating the topics in a culturally relevant manner.

As mentioned, Kotsis [8] emphasizes the importance of an inclusive learning environment and highlights the benefits of differentiated instruction. Similarly, Vera [4] argues that social inclusion in education requires new approaches to

communication and teaching that accommodate students' individual needs, including sensory and spatial considerations.

Kotsis [8] views technology as an educational and communication tool—not a replacement for traditional teaching practices—that can boost student engagement, motivation, and academic achievement. The work cites examples such as interactive software, multimedia materials, and online platforms.

Regarding technology integration, Avendaño [9] examines the use of metaverses—three-dimensional immersive virtual environments—as innovative pedagogical tools.

As Ganesan [7] suggests, further research is needed to evaluate long-term impacts on students, improve teacher training in designing and implementing learning experiences, integrate science communication tools into STEAM education, and explore the intersectionality between science communication and sociocultural contexts.

VI. CASE STUDIES AND BEST PRACTICES

This section presents some concrete strategies and case studies that exemplify how the intersection of STEAM education, science communication, and societal awareness can be enacted.

From the gamified science communication approach in [24], the following best practices can be identified: engaging diverse learners, designing culturally meaningful materials, centering underrepresented communities, combining science communication models, and ensuring visibility and representation. However, Rillero [36, p.7] asserts that "[c]ultural relevance in STEM education extends beyond mere inclusion of diverse examples to encompass a deeper understanding and validation of students' cultural identities, experiences, and ways of knowing." According to the authors, STEAM education should recognize and build upon students' cultural and linguistic resources while addressing inequitable practices.

Additional best practices recommended by Rillero [36] include implementing family-centered, project-based learning, recognizing students' aspirational, familial, and linguistic capital to inform instruction and identity-building activities, and promoting intergenerational science communication.

Seidel [15] emphasizes the value of science communication through video storytelling as an educational tool. This approach expands learning opportunities for underrepresented student communities, enabling them to explore cultural connections to food systems, plants, and animals and to share their knowledge.

Kotsis [8] outlines the important qualities of effective STEM educators, including a strong background in STEM, a solid understanding of its concepts and trends, effective problem-solving and communication skills, and a passion for interdisciplinary learning. In this context, integrating technology and science communication into STEAM lessons can support students' unique learning needs while fostering curiosity and a desire for experimentation in inclusive classrooms. Avendaño [9] notes that Latin America faces challenges in adopting emerging technologies in education, including budget constraints and limitations in connectivity and infrastructure.

Kotsis [8] also emphasizes the importance of collaboration between engineering faculty and STEM educators in hands-on learning activities that foster creativity and enhance student engagement. The study adds that collaboration between educators and industry professionals provides enriching experiences that benefit both students and instructors.

Regarding gender disparities in STEM, Kotsis [8] argues that early STEM education plays a crucial role in building inclusive and supportive learning environments.

Avendaño [9] reports on the implementation of an educational metaverse that includes materials on analytic geometry calculus, linear algebra, probability, statistics, and formative assessment. The 3D immersive environment improved learning outcomes in these subjects and increased motivation and engagement among Maya-Tzeltal students from rural communities in Chiapas, Mexico. This example illustrates how immersive technologies can be culturally responsive when designed for specific linguistic and regional communities.

Taking into account students' sociocultural realities, Vera [4] recommends implementing collaborative activities, inclusive teaching materials, and culturally responsive strategies such as community dialogues and cultural fairs. This work strongly advocates for making cultural diversity a core element of education.

Building on these strategies, one notable feature of integrating cultural, technological, and contextual elements into STEM education is the adaptability of approaches such as the Culturo-Techno-Contextual Approach, which can be tailored to different cultures using culturally relevant strategies and materials [12]. One example of such adaptation is the inclusion of culturally relevant storytelling, as mentioned in this review.

Table II summarizes a set of strategies and notable cases that illustrate how the intersection of STEAM education, science communication, and sociocultural sensitivity can translate into effective educational practices. These evidence-based experiences, implemented in diverse contexts, offer replicable paths for educators, science communicators, and curriculum designers committed to more inclusive and contextualized teaching.

TABLE II. Best practices in STEAM education and science communication with sociocultural awareness.

Strategy or Practice	*Educational and Sociocultural Applications*
Gamification and Cultural Narratives [24]	Use of games, simulations, and role-playing to promote scientific literacy and culturally meaningful discussions.
Family-Centered Project-Based Learning [36]	Recognition of family and linguistic capital; intergenerational participation in STEAM activities.
Science Video Storytelling [15]	Promotes connections between science and culture in marginalized communities through digital narratives.

Immersive Education (Metaverses) [9]	Improved learning and motivation in rural communities (e.g., Maya-Tzeltal students) through tailored 3D environments.
Collaboration Between Teachers and Professionals [8]	Enhancing STEAM learning through joint work between educators and industry or science communication professionals.
Culturally Aware Technology Integration [4]	Use of digital tools with attention to students' functional, linguistic, and cultural diversity.
Culturo-Techno-Contextual Approach [Oladejo]	STEAM curriculum design that integrates local knowledge, technological tools, and geographical context.

The synthesis of case studies and practices presented in Table II offers a framework that can guide the design of inclusive, culturally grounded, and communication-enhanced STEAM education initiatives.

Altogether, the practices exposed above suggest that inclusive STEAM education requires more than just curriculum design —it must integrate cultural knowledge, community collaboration, and adaptive communication strategies.

VII. CONCLUSIONS

This review presents multiple examples, such as the use of metaverses, digital storytelling, and gamification, demonstrating how science communication can be meaningfully integrated into STEAM education when informed by sociocultural contexts. Three key dimensions emerge at the intersection of STEAM education, science communication, and sociocultural sensitivity: students' science identity, self-efficacy, and civic engagement.

The review also acknowledges the tension between traditional teaching methodologies and the need for cultural relevance in education. While the examples discussed provide valuable guidance, a more critical perspective is needed to assess their effectiveness, especially considering the lack of consensus on implementation practices across varied audiences and local institutional settings. Best practices suggest that these models should not only be replicated but also systematically documented at every stage—from design to evaluation.

An important insight derived from this review is the expanded role of teachers and educators, who also serve as mentors, role models, and science communicators. This highlights the need for adequate training in educational strategies that address cultural and technological diversity, as well as in the use of culturally responsive curricula and science communication tools.

To fully harness the benefits of science communication as an educational strategy, science communicators must collaborate with educators in tailoring their approach to specific audiences while aligning it with educational objectives.

Policymakers and institutions should actively support initiatives, such as interdisciplinary programs, teacher training, and infrastructure, that integrate STEAM education, scientific knowledge, and cultural diversity. There is also a growing need for interdisciplinary collaboration involving educators, communicators, technologists, artists, and local communities.

For future research and practice, a critical evaluation is needed to understand better the impact of science communication on students' science identity, self-efficacy, and civic engagement, using both qualitative and quantitative methods. Additionally, educational strategies such as translanguaging should incorporate prior knowledge and local cultural perspectives into STEM curricula, where applicable.

Although challenges persist globally in STEM education and science communication, they are particularly pressing in Latin America, where structural inequalities, linguistic and cultural diversity, and institutional barriers must be addressed through context-sensitive, inclusive, and innovative approaches.

REFERENCES

[1] Illingworth, S. & Prokop, A., *Science communication in the field of fundamental biomedical research*, Semin. Cell Dev. Biol. **70**, 1–9 (2017). https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2017.08.017

[2] Fracchiolla, C., Buonomo, V. & Gupta, P., *Science communication at science museums: Designing for inclusion, equity, and belonging*, Front. Sci. Commun. **9**, 1356825 (2024). https://doi.org/10.3389/fscom.2024.1356825

[3] Llorente Cejudo, C., Revuelta, G., Carrió, M. & León, B., *Science communication and scientific literacy: An intertwined evolution*, Front. Commun. **8**, 1212173 (2023). https://doi.org/10.3389/fcomm.2023.1212173

[4] Vera, J., Mecias, A. & Quimi, O., *Sensory and spatial adaptation for social inclusion in the educational model of higher education*, INTRA: Interdiscip. Res. Anal. J. **1**, 1–9 (2025).

[5] Benitez, R., *Cariño, standards, and the reinforcement loop: How mathematics and science teachers integrate engineering-based learning in the Borderlands at an all-girls STEAM school*, Doctoral dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA (2024).

[6] Pedrosa de Souza, D. & Ferreira, H. S., *Potentials of the Science, Technology, Engineering, Arts and Mathematics (STEAM) education for gender inclusion in science: A systematic literature review*, Rev. Electron. Ens. Cienc. **24**, 186–207 (2025). https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.2271 *(Note: DOI provided here is illustrative; confirm actual DOI if available.)*

[7] Ganesan, U., *Evidence-based teaching interventions for emergent multilingual students in high school science classrooms: A literature review*, Discov. Educ. **4**, 41 (2025). https://doi.org/10.1007/s44217-025-00423-8

[8] Kotsis, K. T., *Optimal STEM educators for elementary school: Students from the Primary Education vs. Science Department*, J. Eff. Teach. Methods **3**, 15–29 (2024). https://doi.org/10.59652/jetm.v3i1.360

[9] Avendaño Porras, V. del C., Alfonzo Albores, I. & Correal Cuervo, S. A., *Practical dimensions of the metaverse in*

distance education: Case study with indigenous students from a community in Mexico, Turk. Online J. Distance Educ. **26**, 193–203 (2025). https://doi.org/10.17718/tojde.1444855

[10] Alderfer, J. T., Ly, A. R., Sato, B. K. & Brownell, S. E., *Building science capital through science communication: Evidence from an undergraduate microbiology engagement project*, J. Microbiol. Biol. Educ. **24**, 24.1.27 (2023). https://doi.org/10.1128/jmbe.00127-23

[11] Murphy, P. K. & Kelp, K. L., *Building bridges between science communication and literacy instruction: A review of interventions*, Read. Res. Q. **58**, 25–46 (2023). https://doi.org/10.1002/rrq.477

[12] Oladejo, A. I., Olateju, T. T., Okebukola, P. A., Sanni, R., Akintoye, H., Onowugbeda, F., Ayanwale, M. A., Agbanimu, D. O., Saibu, S. & Adam, U., *Breaking barriers to meaningful learning in STEM subjects in Africa: A systematic review of the Culturo-Techno-Contextual Approach*, Sustainability **17**, 2310 (2025). https://doi.org/10.3390/su17052310

[13] Andrade, I. S. & Teixeira, P. M. M., *STS education and STEM education: A comparative analysis*, Rev. Bras. Pesqui. Educ. Ciênc. **25**, e58136 (2025). https://doi.org/10.28976/1984-2686rbpec2025u133160

[14] Bhagwati, R., *STEM success beyond borders: The synergy of language education and engineering education in the USA*, Am. J. Lang. Lit. Learn. STEM Educ. **3**, 1 (2025).

[15] Seidel, D., Staffen, M., Abdallah, L. & Morin, X., *Outcomes of a 4-H STEM learning enrichment program using video storytelling*, J. Ext. **63**, Article 18 (2025). https://open.clemson.edu/joe/vol63/iss1/18

[16] Zhou, Y. & Shirazi, S., *Factors influencing young people's STEM career aspirations and career choices: A systematic literature review*, Int. J. Sci. Math. Educ. (2025). https://doi.org/10.1007/s10763-025-10552-z

[17] Benedito, B. O., Silva, E., Woida, L. M. & Vitoriano, M. C. C. P., *Analysis of public policies for women's social inclusion in Science, Technology and Innovation (STI): training, access and permanence*, Rev. Ibero-Am. Estud. Educ. **20**, e19606 (2025). https://doi.org/10.21723/riaee.v20i00.1960602

[18] Dou, R., Villa, N., Cian, H., Sunbury, S., Sadler, P. M. & Sonnert, G., *Unlocking STEM identities through family conversations about topics in and beyond STEM: The contributions of family communication patterns*, Behav. Sci. **15**, 106 (2025). https://doi.org/10.3390/bs15020106

[19] Teshera-Levye, J., Alam, I., Corwin, L., & Dauer, J. M., *Developing a conceptual model for students' scientific civic engagement self-concept*, Int. J. Sci. Educ. **45**, (2025). https://doi.org/10.1080/09500693.2024.2449220

[20] Ziegler, R., Hedder, I. R. & Fischer, L., *Evaluation of science communication: Current practices, challenges, and future implications*, Frontiers in Communication **6**, Article 669744 (2021). https://doi.org/10.3389/fcomm.2021.669744

[21] Lorke, J., Ballard, H. L., & Robinson, L. D., *More complex than expected—Mapping activities and youths' experiences at BioBlitz events to the rosette model of science communication*, Front. Environ. Sci. **11**, 1270579 (2024). https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1270579

[22] Krebs, C., Sowcik, M. & Loizzo, J., *Using the four-frame leadership approach to mobilize strategic science communication efforts*, EDIS **AEC791**, University of Florida IFAS Extension (2024). https://doi.org/10.32473/edis-WC452-2024

[23] El-Adawy, A., Masliah, D., Bouhali, O., Joshi, N., Khader, M. & Reimers, A., *Beyond the lab: Empowering science communication with interactive and inclusive outreach strategies*, EPJ Web Conf. **304**, 09001 (2024). https://doi.org/10.1051/epjconf/202430409001

[24] del Cerro-Sánchez, C., Amarelle, V., Platero, R., Pérez-Pantoja, D., Wicki-Emmenegger, D., Chavarría, M. & Durante-Rodríguez, G., *Gamifying science—Novel strategies for bringing microbiology to the classroom*, Microb. Biotechnol. **18**, e70141 (2025). https://doi.org/10.1111/1751-7915.70141

[25] Erzingmüller, A., Glaeser, B., & Peters, H. P., *Science communication in the climate crisis: Insights from climate scientists in Germany*, Public Underst. Sci. **33**, 338–355 (2024). https://doi.org/10.1177/09636625241234955

[26] Ulbrich, E., Tejera, M., Schmid, A., Sabitzer, B. & Lavicza, Z., *Fostering the four C's: A gendered perspective on technology use in STEAM education*, Educ. Sci. **15**, 528 (2025). https://doi.org/10.3390/educsci15050528

[27] Le Boulicaut Ennis, E., on behalf of the ATLAS Collaboration, *Sharing ATLAS science: Communicating to the public*, EPJ Web Conf. **295**, 08016 (2024). https://doi.org/10.1051/epjconf/202429508016

[28] Dvorzhitskaia, L., Zamora, J., Sanders, D., Verheyden, E. & Clerc, M., *Exhibition research and practice at CERN: Challenges and learnings of science communication "in the making"*, Front. Sci. Commun. **9**, 1276583 (2024). https://doi.org/10.3389/fscom.2024.1276583

[29] Horn, M. & Woodward, E. L., Sanford Underground Research Facility's approach to school education, community activities, and public outreach. *Frontiers in Physics*, **11**, 1310451 (2023). https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1310451

[30] Scotti, V., *Social media and storytelling: Tools to raise engagement with physics*, PoS: Proc. Sci. **395**, 957 (2020). https://doi.org/10.22323/1.395.0957

[31] Collà Ruvolo, C., Greco, A. & Scianitti, F., *Telling kids about physics in interactive online communication formats*, PoS: Proc. Sci. **ICHEP2022**, 391 (2022). https://doi.org/10.22323/1.414.0391

[32] van Scherpenberg, J., López-Oramas, A., Manganaro, M., & Strišković, J., on behalf of the MAGIC Collaboration, *#meetTheMAGICians: Science communication and visibility of young researchers*, PoS: Proc. Sci. **395**, 1389 (2022). https://doi.org/10.22323/1.395.1389

[33] Lijo, J., Dooley, J., & Barry, A., *Cultivating climate conversations through science communication: Engaging rural communities in climate adaptation*, Front. Commun. **9**, 1312854 (2024). https://doi.org/10.3389/fcomm.2024.1312854

[34] Steward, B. C., Nguyen, N., & Anderson, A. A., *"You don't belong in STEM": Examining the role of science identity in imposter syndrome and STEM career decisions*, Front. Psychol. **14**, 1105243 (2023). https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1105243

[35] Decaroli, C. & Malinowski, M., *"Do you speak quantum?" A quantum physics and art exhibition*, Opt. Eng. **61**, 081807 (2022). https://doi.org/10.1117/1.OE.61.8.081807

[36] Rillero, P., Jiménez-Silva, M., Short-Meyerson, K. & Rillero, K. M., *From seeds to harvest in seven weeks: Project-based learning with Latina girls and their parents*, Educ. Sci. **15**, 246 (2025). https://doi.org/10.3390/educsci15020246

Explorando la física de los rompeolas: un experimento didáctico para comprender la disipación de las olas

ISSN 1870-9095

Alan Arias[1], Antonio Horta-Rangel[1], Jorge Noriega[1], Norma Gutierrez[1], MH Ramírez[2]
[1]*División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato. Av. Juárez # 77; Zona Centro. C.P. 36000. Guanajuato, Guanajuato. Tel. (473)7320006 ext. 5321.*
[2]*Instituto Politécnico Nacional, México.*

E-mail: aj.ariasdiosdado@ugto.mx

(Recibido el 30 mayo de 2025, aceptado el 4 de julio de 2025)

Resumen

Este trabajo presenta una experiencia didáctica de laboratorio de Mecánica de Fluidos a nivel universitario como parte de un proyecto propuesto en el curso para analizar físicamente la disipación de la energía del oleaje en su interacción a escala con estructuras rompeolas de geometrías diversas. El experimento se basa en la simulación del comportamiento del oleaje en una canaleta, interactuando con elementos particulares de rompeolas bajo distintos diseños propuestos, para establecer un comparativo en relación con los resultados de las mediciones de la disipación de energía del oleaje en cada caso. El montaje experimental incluye un canal transparente, una tarjeta Arduino, sensores resistivos FC-028 y un generador de olas operado por un motor a pasos NEMA 17, lo que permite controlar la amplitud y frecuencia del oleaje. Se analizaron dos modelos de rompeolas fabricados en acrílico, uno de doble placa plana (DFPT) y otro de doble arco (DAPT), mediante mediciones de altura de la ola antes y después del obstáculo, valorando su capacidad para disipar la energía. Esta actividad y su dinámica realizada permiten explorar conceptos fundamentales en la Física de Fluidos y transferencia de energía, integrando física, ingeniería y tecnología en un entorno educativo STEM.

Palabras clave: Rompeolas, Experimento didáctico, Disipación de las olas.

Abstract

This work presents a didactic fluid mechanics laboratory experience at the university level, developed as part of a course project aimed at physically analyzing wave energy dissipation during its interaction—at scale—with breakwater structures of different geometries. The experiment simulates wave behavior in a flume, where waves interact with specific breakwater elements under different proposed designs, allowing for a comparative analysis based on the measured wave energy dissipation in each case. The experimental setup includes a transparent channel, an Arduino board, FC-028 resistive sensors, and a wave generator operated by a NEMA 17 stepper motor, enabling control over wave amplitude and frequency. Two acrylic breakwater models were analyzed, a double flat plate type (DFPT) and a double arch type (DAPT), through wave height measurements taken before and after the obstacle, assessing each model's capacity to dissipate energy. This activity and its implementation provide an opportunity to explore fundamental concepts in fluid physics and energy transfer, integrating physics, engineering, and technology within a STEM educational framework.

Keywords: Breakwater, Didactic experiment, Wave dissipation.

I. INTRODUCCIÓN

Los rompeolas son estructuras ubicadas en el agua y diseñados para mitigar el impacto de las olas en zonas costeras, protegiendo playas, puertos y otros entornos marinos [1]. Estos elementos desempeñan un papel fundamental en la reducción de la energía de las olas antes de que lleguen a la costa, disipando su fuerza y minimizando el potencial de daño que pueden causar. Desde una perspectiva física, los rompeolas modifican el comportamiento de las olas principalmente mediante tres fenómenos: la reflexión, que devuelve parte de la energía de la ola hacia el punto de origen; la transmisión, en la cual una fracción de la energía logra pasar a través o por encima de la estructura; y la disipación, que representa la pérdida de energía por turbulencia, fricción o deformación del flujo al interactuar con el rompeolas [2]. La predominancia de uno u otro fenómeno depende tanto del tipo de rompeolas como de las características del oleaje y del entorno. Desde un enfoque STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas), la experimentación con estructuras rompeolas brinda a profesores y estudiantes la oportunidad de diseñar y evaluar soluciones que interactúen con el oleaje, utilizando sensores, microcontroladores y software de adquisición de datos. Esta actividad permite aplicar de forma práctica principios de la física que facilitan la comprensión de propiedades generales de las ondas.

El oleaje es la propagación de ondas mecánicas en la superficie del agua producidas cuando la energía del viento se transfiere al agua, generando un movimiento circular de las partículas en la superficie, caracterizadas por la oscilación periódica de la superficie del líquido, formando crestas y valles que se desplazan horizontalmente [3]. Como se ilustra en la figura 1, los parámetros más importantes para describir una onda son:

- Longitud de onda (λ): Distancia horizontal entre dos crestas o dos valles sucesivos (m).
- Período (T): Es el tiempo (s) entre el paso de dos crestas sucesivas por un mismo punto.
- Amplitud (A): Distancia vertical entre la cresta y el nivel del mar (m).
- Velocidad de Propagación (v): Es la relación entre la longitud de onda y el período (m/s).
- Frecuencia (f): Es el número de veces que la onda se repite en una unidad de tiempo y se mide en Hercios (Hz).

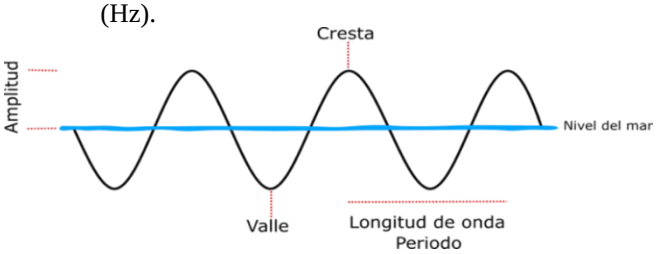


FIGURA 1. Diagrama de las principales propiedades de las ondas.

Periodo y frecuencia están relacionados mediante la siguiente expresión:

$$f = \frac{1}{T}. \tag{1}$$

Al analizar la interacción entre una ola y una estructura, es útil introducir el concepto de longitud de ola relativa (LR), que permite evaluar la escala del rompeolas respecto al tamaño de la ola. Esta se define como:

$$LR = \frac{\lambda}{W}, \tag{2}$$

donde W representa el ancho del rompeolas. Este parámetro ayuda a predecir cómo se comportará una ola al encontrar un obstáculo: si la estructura es mucho más grande que la longitud de onda se comportará casi como una barrera; en cambio, si la longitud de onda es similar o mayor, fenómenos como la transmisión y la reflexión serán más relevantes. Además de las características antes mencionadas, hay tres coeficientes clave en el estudio de la interacción entre el oleaje y las estructuras rompeolas: reflexión (Kr), transmisión **(**Kt) y disipación (Kd), los cuales permiten cuantificar cómo se distribuye la energía del oleaje tras impactar con el obstáculo.

La reflexión ocurre cuando una ola choca contra un obstáculo y parte de su energía regresa en sentido contrario. Este coeficiente (Kr) representa la relación entre la altura del oleaje reflejado (Hr) y la altura del oleaje incidente (Hi) [4]. Experimentalmente, la altura de la ola reflejada y la altura de la ola incidente se pueden determinar colocando dos medidores de altura de ola (#1 y #2 figura 6) para monitorear la elevación de la superficie libre del agua respecto al tiempo y separar las alturas de la ola incidente y reflejada.

$$Kr = \frac{Hr}{Hi}. \tag{3}$$

La transmisión ocurre cuando parte de la energía del oleaje atraviesa el rompeolas, generando una ola reducida al otro lado. Este coeficiente (Kt), se define como la relación entre la altura de la ola transmitida (Ht) y la altura de la ola incidente (Hi). Experimentalmente, la altura de la ola incidente y la altura de la ola transmitida se pueden determinar a partir de las elevaciones de las olas, colocando un medidor de altura de ola (#3 figura 6) en la parte posterior del rompeolas [5].

$$Kt = \frac{Ht}{Hi}. \tag{4}$$

La disipación de energía mediante el uso de un rompeolas se cuantifica usando el coeficiente de disipación (Kd), que indica la fracción de energía del oleaje que se pierde en la interacción con la estructura. Este coeficiente varía entre 0 (sin pérdidas) y 1 (disipación total), y está relacionado con los coeficientes de reflexión (Kr) y transmisión (Kt) por la expresión [6]:

$$\mathrm{Kr}^2 + \mathrm{Kd}^2 + \mathrm{Kt}^2 = 1. \tag{5}$$

II. MÉTODOS Y MATERIALES

El diseño experimental consistió en un generador de olas, sensores de profundidad y dos estructuras rompeolas. Como se puede ver en la figura 2, el generador de olas se construyó con un motor a pasos NEMA 17 acoplado a una placa acrílica de 8.3 × 28 cm; para su montaje, se diseñaron e imprimieron en 3D los brazos y la base que permiten su rotación. El motor fue controlado mediante un puente H L298 conectado a una tarjeta Arduino Uno.

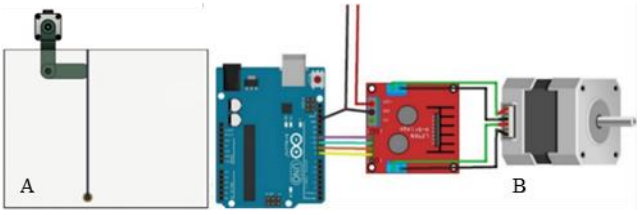


FIGURA 2. A) Esquema del generador de olas, B) diagrama de conexiones.

Para medir la altura de las olas se utilizaron tres sensores resistivos FC-028. Estos sensores operan como un divisor de tensión junto con una resistencia fija, entregando una señal analógica entre 0 y 5 V, dependiendo de la profundidad de inmersión. Para su instalación, los sensores se montaron en un soporte colocado sobre la parte superior del canal, lo que

permitió ajustar manualmente su profundidad durante el proceso de calibración (Figura 3).

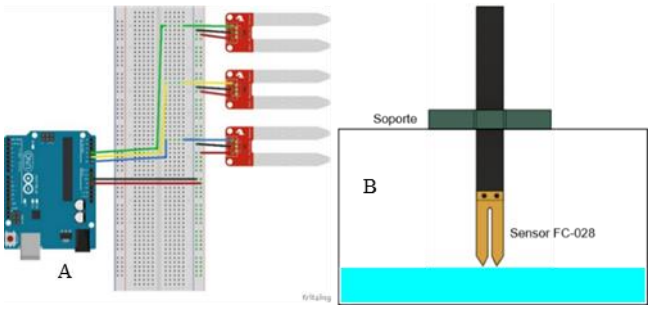


FIGURA 3. A) Esquema de conexiones de los medidores de altura, B) soportes de los medidores de altura.

Para la construcción de los rompeolas se utilizaron placas de acrílico de 3 mm de espesor. El modelo de doble placa plana (DFPT, por sus siglas en inglés) se construyó con dos placas de 8.5 cm × 4 cm, mientras que el modelo de doble arco (DAPT, por sus siglas en inglés) empleó dos placas de 8.5 cm × 5 cm con un ángulo de 60° y una longitud de arco de 5 cm. Ambas configuraciones se montaron sobre varillas roscadas de 5/16'', fijadas con tuercas, manteniendo una separación constante de 1.5 cm entre placas (figura 4).

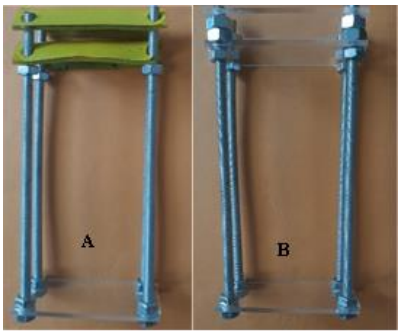


FIGURA 4. Modelos rompeolas construidos. A) Rompeolas DAPT, B) rompeolas DFPT.

Para calibrar los sensores FC-028 se registró el voltaje en función de la profundidad de inmersión, generando un gráfico que permitió obtener una curva de ajuste lineal y su correspondiente ecuación. Este procedimiento se llevó a cabo de manera individual para cada uno de los sensores resistivos (figura 5).

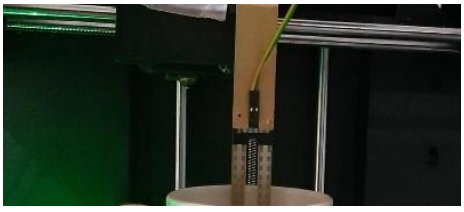


FIGURA 5. Calibración de los sensores FC-028.

Para realizar el experimento se utilizó un canal de 5 m de largo, 0.086 m de ancho y 0.3 m de profundidad, llenado hasta una altura de 0.23 m. Sobre el canal se instalaron tres medidores de altura de ola (Figura 6): el medidor #2 se ubicó frente al rompeolas, el medidor #1 delante del medidor #2, y el medidor #3 en la parte posterior del rompeolas. El generador de olas fue controlado mediante una tarjeta Arduino Uno, ajustando la velocidad y el número de pasos del motor para producir olas con diferentes características. Estas se determinaron a partir de las gráficas del acelerómetro lineal de un celular, colocado previamente sobre la superficie libre del agua, utilizando la aplicación Arduino Science Journal (Figura 7).

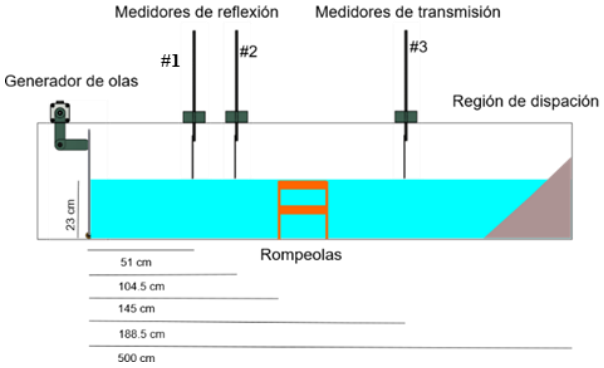


FIGURA 6. Ubicación de los medidores de altura.

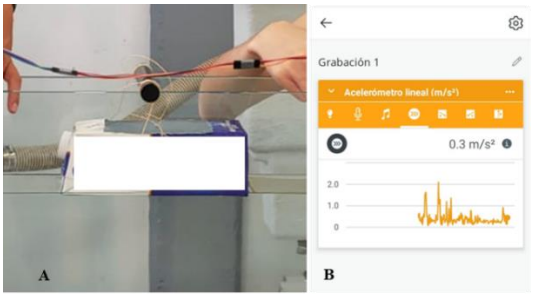
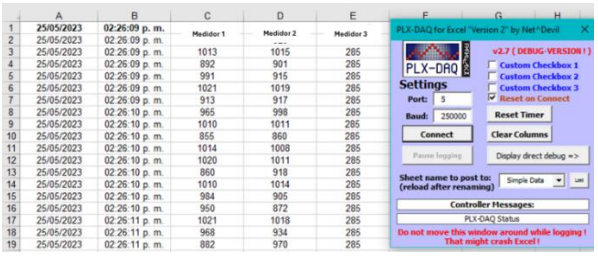


FIGURA 7. A) Celular sobre la superficie libre del agua, B) lecturas del acelerómetro lineal del celular.

Las lecturas de los medidores de altura se tomaron de manera simultánea para registrar el desplazamiento de la superficie libre del agua. Estas lecturas se grafican en Excel a intervalos de 100 milisegundos utilizando la interfaz del sistema Parallax Data Acquisition System (figura 8).



	A	B	C	D	E
1	25/05/2023	02:26:09 p. m.	Medidor 1	Medidor 2	Medidor 3
2	25/05/2023	02:26:09 p. m.		---	
3	25/05/2023	02:26:09 p. m.	1013	1015	285
4	25/05/2023	02:26:09 p. m.	892	901	285
5	25/05/2023	02:26:09 p. m.	991	915	285
6	25/05/2023	02:26:09 p. m.	1021	1019	285
7	25/05/2023	02:26:09 p. m.	913	917	285
8	25/05/2023	02:26:10 p. m.	965	998	285
9	25/05/2023	02:26:10 p. m.	1010	1011	285
10	25/05/2023	02:26:10 p. m.	855	860	285
11	25/05/2023	02:26:10 p. m.	1014	1008	285
12	25/05/2023	02:26:10 p. m.	1020	1011	285
13	25/05/2023	02:26:10 p. m.	860	918	285
14	25/05/2023	02:26:10 p. m.	1010	1014	285
15	25/05/2023	02:26:10 p. m.	984	905	285
16	25/05/2023	02:26:10 p. m.	950	872	285
17	25/05/2023	02:26:11 p. m.	1021	1018	285
18	25/05/2023	02:26:11 p. m.	968	934	285
19	25/05/2023	02:26:11 p. m.	882	970	285

FIGURA 8. Lecturas simultáneas de los 3 medidores de altura.

II. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de la calibración de los tres medidores de altura (Figura 9). Los gráficos muestran la relación entre el voltaje medido por los sensores y la altura de la ola. A partir de estos datos, se determinaron las funciones de ajuste correspondientes, obteniéndose ecuaciones que describen con precisión la relación entre ambas variables. En todos los casos, los ajustes presentan un coeficiente de correlación $R^2 > 0.99$, lo que indica una excelente correlación entre las variables.

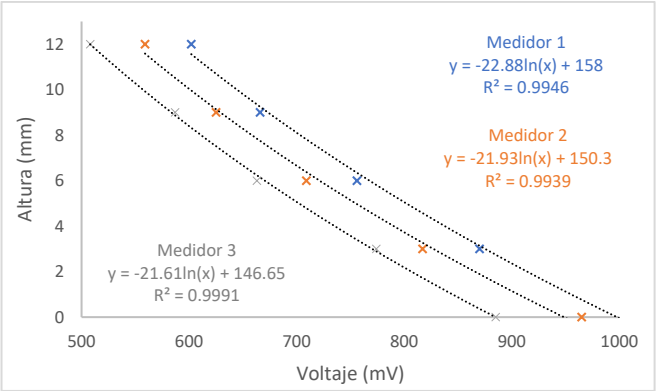


FIGURA 9. Calibración de los medidores de altura.

A partir de los datos obtenidos con el acelerómetro lineal del celular, registrados mediante la aplicación Arduino Science Journal, se construyó una gráfica de aceleración lineal en función del tiempo (Figura 10), se omitieron los valores negativos de aceleración debido a que no son relevantes para determinar las crestas de la onda. Dado que la ola generada presenta un comportamiento periódico, se seleccionó un intervalo de 1.18 segundos para analizar una oscilación completa. El periodo de la onda (T) se determinó como el tiempo transcurrido entre dos crestas sucesivas, obteniéndose un valor de $T = 0.32$ s.

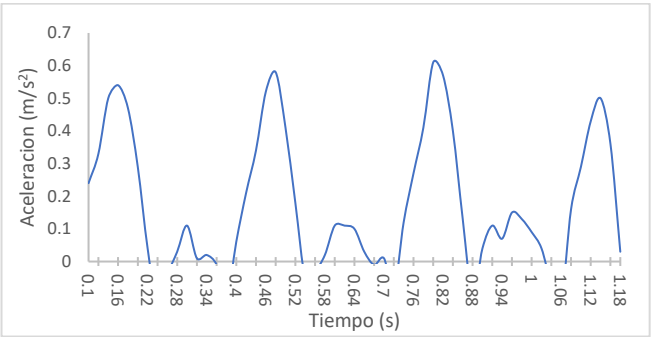


FIGURA 10. Gráfico de aceleración lineal respecto al tiempo.

Para determinar la longitud de onda, se midió la distancia entre dos crestas sucesivas, obteniéndose una longitud de onda L = 0.188 m. A partir de los resultados anteriores se construyó la tabla I, que agrupa los parámetros utilizados para evaluar el efecto de disipación de los rompeolas construidos.

TABLA I. Parámetros para la evaluación de las estructuras rompeolas.

Parámetro	Medida
Ancho del canal (m)	0.086
Largo del canal (m)	5
Altura del agua (m)	0.23
Ancho del rompeolas (m)	0.085
Longitud de onda (m)	0.188
Amplitud (m)	0.0025
Periodo (s)	0.32
Frecuencia (Hz)	3.12
Longitud de onda relativa	2.11

En los siguientes gráficos (figura 11 - 12), se presentan los resultados de las mediciones del desplazamiento de la superficie libre del agua respecto al tiempo para los dos tipos de rompeolas utilizados.

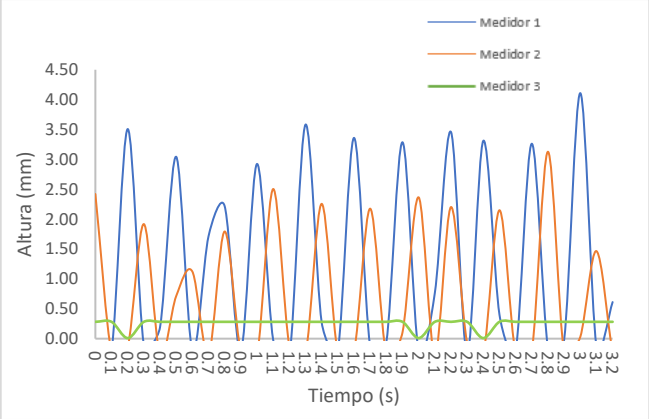


FIGURA 11. Gráfico de la altura de la ola respecto al tiempo para el rompeolas DFPT.

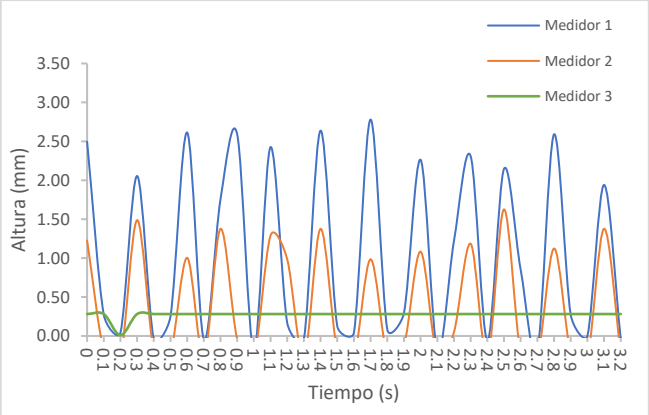


FIGURA 12. Gráfico de la altura de la ola respecto al tiempo para el rompeolas DAPT.

Para obtener los coeficientes de reflexión, transmisión y disipación de los rompeolas en el intervalo de los gráficos (figura 11 y figura 12), se utilizaron las ecuaciones 3, 4 y 5 respectivamente. Los valores de los coeficientes fueron promediados y se determinó su incertidumbre, como se muestra en la tabla II.

TABLA II. Comparativa de los coeficientes de reflexión, transmisión y disipación de los rompeolas.

Rompeolas	Kr	Kt	Kd
DAPT	0.53 ± 0.13	0.12 ± 0.01	0.82 ± 0.09
DFPT	0.65 ± 0.19	0.09 ± 0.02	0.71 ± 0.19

IV. CONCLUSIONES

El experimento realizado permitió evaluar la disipación de energía de dos diseños de rompeolas a escala, analizando los coeficientes de reflexión (Kr), transmisión (Kt) y disipación de energía (Kd) en condiciones controladas. Los resultados obtenidos muestran que el modelo de doble arco (DAPT) presentó una mayor capacidad de disipación de energía, con un incremento del 15.5 % en comparación con el modelo de doble placa plana (DFPT). Por su parte, el modelo DFPT reflejó una mayor proporción de la energía incidente, alcanzando un valor aproximadamente 22.6 % superior al DAPT. La transmisión de energía fue comparable en ambos casos, con valores cercanos entre sí y dentro del margen de error. La implementación de este experimento en el laboratorio puede facilitar la comprensión de fenómenos físicos complejos mediante la observación, la medición y la interpretación de datos.

AGRADECIMIENTOS

Dr. Gilberto Carreño Aguilera
Director de la División de Ingenierías de la Universidad de Guanajuato, por su respaldo institucional y las facilidades brindadas para el desarrollo de este trabajo.

Mtro. Roberto Díaz Cuesta
Director del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Guanajuato, por su valioso apoyo en la gestión de recursos que hicieron posible la adquisición de los componentes electrónicos necesarios para este proyecto.

Mtro. Francisco Ramírez Navarro
Encargado del Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la División de Ingenierías, Campus Guanajuato de la Universidad de Guanajuato, por su apoyo y colaboración para la realización de este experimento.

REFERENCIAS

[1] Burcharth, H. F. *et al.*, Innovative Engineering Solutions and Best Practices to Mitigate Coastal Risk, en *Coastal Risk Management in a Changing Climate*, Elsevier, (2015), pp. 55-170. doi: 10.1016/B978-0-12-397310-8.00003-8.

[2] Elsheikh, A. K., Mostafa, Y. E. & Mohamed, M. M., *A comparative study between some different types of permeable breakwaters according to wave energy dissipation*, Ain Shams Engineering Journal **13**, 101646 (2022), doi: 10.1016/j.asej.2021.11.015.

[3] N. O. and A. A. US Department of Commerce, *Why does the ocean have waves?* Accedido: 3 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://oceanservice.noaa.gov/facts/wavesinocean.html

[4] J. del Valle *et al.*, *Evaluación del coeficiente de reflexión en diques rompeolas de piezas sueltas con perfil en S*, Tecnología y ciencias del agua **10**, 128-152 (2019), doi: 10.24850/j-tyca-2019-02-05.

[5] Li, X. *et al.*, *Numerical study of the wave dissipation performance of two plate-type open breakwaters based on the Navier–Stokes equations*, J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. **43**, 196 (2021), doi: 10.1007/s40430-021-02889-7.

[6] Muttray, M., Oumeraci, H., Zimmermann, C. & Partenscky, H.W., *Wave energy dissipation on and in rubble mound structures*, Coastal Engineering Proceedings **23**, 23 (1992), doi: 10.9753/icce.v23.%p.

Uso de laboratorios STEAM como indicador en el aumento del índice de aprobación en los cursos de física para el nivel medio superior

ISSN 1870-9095

Andres González García[1], Luis David Valadez Ponce[1], Gerardo Valadez Ponce[1], José Emigdio Frausto Macias[1], Víctor Hernández Briseño[2], Belem Michelle Hernández Arriaga[2]

[1]*Universidad de Guanajuato, Escuela de Nivel Medio Superior Centro Histórico León. Av. Álvaro Obregón No. 308, Col. Centro, C.P. 37000, León, Gto., México.*

[2]*Universidad de Guanajuato, Escuela de Nivel Medio Superior de Silao Blvd. Bailleres 196, Col. Centro, C.P. 36100, Silao de la Victoria, Gto., México.*

E-mail: andres.gonzalez@ugto.mx

(Recibido el 4 junio de 2025, aceptado el 3 de octubre de 2025)

Resumen

Se lleva a cabo una revisión sobre el efecto que produce en los cursos de ciencias físicas, para el Nivel Medio Superior (NMS), al poner en marcha la educación STEAM (del inglés, traducible a Ciencia, Tecnología, Ingeniería, Arte y Matemáticas). El estudio se realizó en el marco de la generación académica 2021–2024, desde los cursos inicial y final de Física, correspondientes al Bachillerato Bivalente (BB) y Bachillerato General (BG), con una muestra de 73 estudiantes cuyas edades oscilaron entre 16 y 18 años. Los resultados muestran que, a través de la aplicación de la metodología Educación STEAM, con la implementación de laboratorios virtuales y la realización de experiencias prácticas (experimentales) para los cursos de Ciencias Exactas y Naturales en el NMS, hay una notoriedad del desempeño de pensamiento crítico en los estudiantes. Los datos presentados en esta investigación han concitado el interés de configurar situaciones de aprendizaje con cada profesor de diferentes disciplinas, convirtiéndose en colaboraciones para proyectos de carácter interdisciplinario.

Palabras clave: Educación STEAM, laboratorios virtuales, prototipos educativos.

Abstract

A review is being conducted on the effect produced in physical science courses for the Upper Secondary Level (NMS) by implementing STEAM education (Science, Technology, Engineering, Arts, and Mathematics). The study was conducted within the framework of the 2021–2024 academic generation, from the initial and final Physics courses, corresponding to the Bivalent High School (BB) and General High School (BG), with a sample of 73 students aged between 16 and 18 years. The results show that, through the application of the STEAM Education methodology, with the implementation of virtual laboratories and the execution of practical (experimental) experiences for the Exact and Natural Sciences courses at NMS, there is a notable improvement in students' critical thinking performance. The data presented in this research have sparked interest in configuring learning situations with each teacher from different disciplines, leading to collaborations for interdisciplinary projects.

Keywords: STEAM Education, Virtual Labs, Educational Prototypes.

I. INTRODUCCIÓN

Es bien sabido que el empleo de las tecnologías STEAM en diferentes materias representa una herramienta muy valiosa para hacer crecer y alentar a alumnos de todo grado de enseñanza a conocer las ciencias [1]. En este sentido, han surgido métodos de aprendizaje para luchar contra el abandono escolar por el bajo rendimiento académico y mejorar el índice de aprobación en cursos de ciencias naturales y exactas [2]. Actualmente, está disponible una amplia variedad de herramientas informáticas que son de utilidad para crear nuevos métodos didácticos a todos los niveles, añadiendo el uso de la educación STEAM [3]. Algunas de estas herramientas didácticas son: Proteus, MicroCode Studio, Matlab, LabVIEW, GeoGebra, Fritzing, entre otros, los cuales se utilizan en el desarrollo de conocimiento técnico, así como en disciplinas como biología, medicina, ingeniería, industria, economía, contaduría y humanidades. Estas herramientas de computación se ofrecen como entornos que permiten la depuración, simulación y escritura de algoritmos informáticos, los cuales son útiles no solo para los principiantes en programación, sino también para el diseño de proyectos complejos [6]. Posibilitan que se representen ideas abstractas de forma concreta, que se fortalezcan habilidades esenciales en programación y electrónica, y que se estimule el trabajo en equipo, el pensamiento crítico y la capacidad de aprender por uno mismo [7]. En el ámbito de la educación STEAM, las tarjetas programables, como los microcontroladores PIC, tienen una utilidad particular

debido a que son fáciles de integrar con varios sensores. Esto posibilita que los alumnos elaboren proyectos en los que vinculan teoría y práctica, desarrollando capacidades para dibujar, simular y ensayar circuitos electrónicos, lo cual disminuye errores y optimiza recursos. Se llevó a cabo un prototipo para medir la velocidad del sonido en aire, usando sensores de temperatura y ultrasónicos que se conectaron a un microcontrolador PIC. En Fritzing, se llevó a cabo el diseño en primera instancia. En este programa, se puede observar cómo están conectados el sensor de temperatura LM35, el sensor ultrasónico, la pantalla LCD y el microcontrolador 16F877A. Se empleó PicBasic Pro en MicroCode Studio para la programación, lo que posibilitó el cálculo del tiempo de viaje de la señal ultrasónica y su conversión a velocidad del sonido v. Se empleó la siguiente ecuación:

$$v = 331\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right] + 0.606T_C, \tag{1}$$

donde T_C es la temperatura en grados Celsius. Para mayor rigor, también se consideró la expresión derivada de la física de gases ideales:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}, \tag{2}$$

donde γ representa la constante adiabática (γ = 1.4), R la constante universal de los gases (R = 8.314 [J/mol·K]), T es la temperatura en Kelvin y M = 0.029 [kg/mol]. El prototipo se simuló en Proteus y se armó en un *protoboard* para que los estudiantes manipularan variables como temperatura, distancia y tiempo de propagación. Se elaboraron gráficas de regresión lineal para calibrar el sensor de temperatura y relacionar la velocidad del sonido con el voltaje de salida del sensor. Este tipo de experiencia promueve el aprendizaje activo, la comprobación de teorías físicas con datos reales y el pensamiento crítico [4]. Además, es parte del modelo interdisciplinario planteado como educación STEAM-Ludoplastia, integrando ciencia, tecnología, ingeniería, arte y matemáticas con metodologías lúdicas y creativas [5].

II. METODOLOGÍA

Este trabajo adoptó un perfil cuantitativo, descriptivo y correlacional, con diseño experimental, para evaluar el beneficio de usar laboratorios virtuales en la educación STEAM y reflejarse en la aprobación de cursos de física en el Nivel Medio Superior (NMS). Se tomó como ejemplo el prototipo para medir la velocidad del sonido en aire y demostrar que depende de la temperatura [7]. El prototipo se usó como ejemplo de laboratorio para el tema de ondas en la Unidad de Aprendizaje (UDA) de Magnetismo, Ondas y Óptica de los grupos de quinta y cuarta inscripción del BG y BB. Para la guía en la construcción se utilizaron las siguientes herramientas computacionales: ***Proteus***. Para simulación de circuitos electrónicos. ***MicroCode Studio + PBP***. Para la programación de microcontroladores PIC [8]. ***Fritzing.*** Para el diseño visual y la explicación didáctica del prototipo [8]. En cada montaje experimental siguieron los siguientes procedimientos: Cada dispositivo electrónico se modeló en Fritzing [9], programación del microcontrolador PIC (modelo 16F877A) en MicroCode Studio [10], simulación en Proteus [11], además de la validación funcional, montaje físico en protoboard, aplicación en clase y recolección de datos académicos y perceptuales. La práctica consistió en diseñar, simular y construir un prototipo que incluye un microcontrolador, un sensor ultrasónico y un sensor de temperatura [12]. La señal ultrasónica se utilizó para calcular la velocidad del sonido, considerando la variación con la temperatura. El diseño de cada elemento electrónico en Fritzing se muestra en la Figura 1, y la programación del microcontrolador en MicroCode Studio + PicBasic Pro se muestra en la Figura 2 [13].

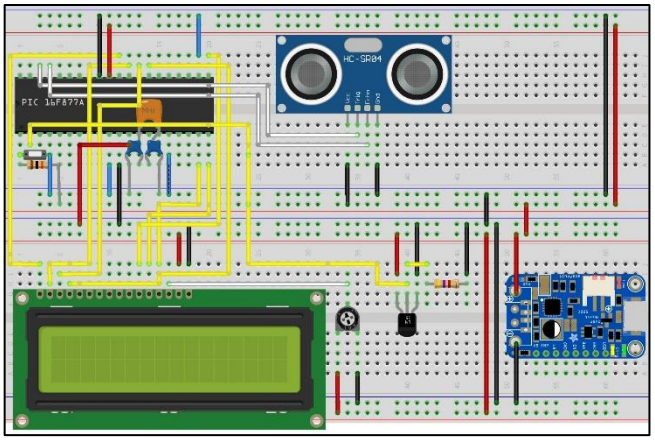


FIGURA 1. Diagrama del circuito elaborado en Fritzing. Representa el sensor ultrasónico, el sensor de temperatura, el microcontrolador PIC y la pantalla LCD.

```
'*****************************************************************
'Defincion de Parámetros
define OSC 4                    ' Define cristal a 4 Mhz

'Definición pantalla LCD
define LCD DREG PORTD
define LCD DBIT 4
define LCD_RSREG PORTD
define LCD_RSBIT 0
define LCD_RWREG PORTD
define LCD RWBIT 1
define LCD EREG PORTD
define LCD_EBIT 2

'Definición ADC
define ADC_BITS 10
define ADC_CLOCK 3
define ADC_SAMPLEUS 50

'Definición de variables
T      con 5                        'Resolución de cristal 4 MHz
g      con 223                      'Símbolo de grado.
d      var word                     'Variable datos
vel    var word
dist   var word
temp   var word
Canal0 var word

'Código habilita AN0
ADCON1 = %1110                      'Habilitar AN0 del PIC

Inicio:
adcin 0, Canal0                     'Datos para ADC
low     PORTB.5                     'Inica en 0 lógico Puerto B.5
pulsout PORTB.5,5                   'Recibe pulso del SRF
pulsin  PORTB.4,1,d                 'Cuenta los I's logicos del SRF
dist  = (d*T/60) + (TEMP*T)/33333   'Mide la distancia (m)
temp = Canal0/128                   'Mide la Temperatura (grados)
vel  = 33161 + 61*temp              'Mide la velocidad (m/s)
lcdout $FE, $80, "Vel. Sonido en aire"
lcdout $FE, $C0, "Dist.= ", dec1 dist/100,".",dec2 dist," m"  'Dist. en LCD
lcdout $FE, $94, "Vel. = ", dec3 vel/100,".",dec2 vel," m/s"  'Vel. en LCD
lcdout $FE, $D4, "Temp.= ", dec temp,g,"C"                    'Temp.en LCD
pause 100
goto Inicio
```

FIGURA 2. Código en MicroCode Studio + PicBasic Pro para calcular tiempo, distancia y velocidad del sonido.

La simulación del diseño electrónico en Proteus se muestra en la Figura 3 y el montaje experimental se presenta en la Figura 4.

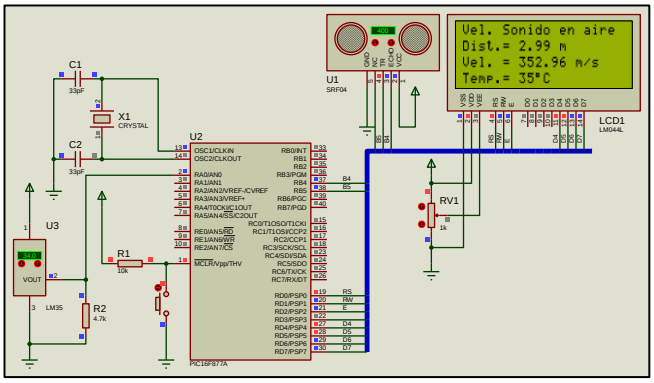


FIGURA 3. Simulación en Proteus. Visualización del circuito y resultados en pantalla.

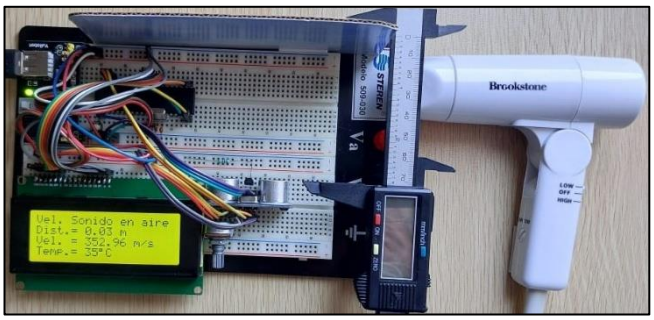


FIGURA 4. Prototipo ensamblado en protoboard. Incluye todos los elementos electrónicos citados en la Tabla I.

La descripción de cada elemento electrónico utilizado, además de los softwares de simulación, se muestra en la Tabla I.

TABLA I. Componentes utilizados en el diseño y simulación del prototipo experimental.

Dispositivo/Software	Descripción
16F877A	Microcontrolador PIC
XT-4 MHz	Oscilador externo para el PIC
22 pF	Capacitores de señal
LM35	Sensor de temperatura
SRF04	Sensor ultrasónico.
LCD 20x4	Pantalla de cristal líquido.
Fritzing	Diseñador de circuitos electrónicos y PCB
Proteus	Simulador para validar circuitos electrónicos
MicroCode Studio + PBP	Compilador y programador para microprocesadores.

La investigación se realizó con una muestra total de 73 estudiantes, con edades entre 16 y 18 años, pertenecientes a los programas BG y BB. Los grupos fueron distribuidos en dos modalidades de enseñanza: ***Educación tradicional*** impartida para el periodo académico de agosto-diciembre 2021 a enero-junio 2022. ***Educación STEAM*** impartida para el periodo académico de agosto-diciembre 2022 a enero-junio 2024. Se aplicaron evaluaciones académicas parciales y finales, encuestas de percepción tanto a estudiantes como docentes, y cuestionarios sobre satisfacción y efectividad metodológica. Los resultados de la investigación se muestran en la Tabla II y se analizaron para ambas modalidades de enseñanza.

TABLA II. Datos estadísticos comparativos entre la educación STEAM y la tradicional.

Educación STEAM		Educación tradicional	
Media:	8.61	Media:	7.09
Mediana:	8.75	Mediana:	7.0
Moda:	9.0	Moda:	7.0
Rango:	9.5 - 5.0 = 4.5	Rango:	9.5 - 5.0 = 4.5
Desviación estándar:	0.84	Desviación estándar:	0.86

El análisis estadístico se llevó a cabo utilizando el software Origin 2025, realizando una correlación lineal entre metodología y rendimiento, prueba de hipótesis con **t-Student** para significancia estadística y cálculo de incertidumbre con la ecuación:

$$Incertidumbre = \pm t \frac{s}{\sqrt{n}}, \qquad (3)$$

Donde t es el valor crítico (95% de confianza), s la desviación estándar y n el número de repeticiones. Las etapas del estudio fueron: ***una etapa inicial***. Grupos de elección y análisis de aprobación inicial. ***Fase de implementación***. Implementación de prácticas STEAM (2023-2024). ***Fase de análisis***. Análisis estadístico y comparación con la educación tradicional. ***Fase de restricciones***. Se tomaron en cuenta factores externos como rezago educativo, situación socioeconómica y disponibilidad de recursos.

III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados encontrados, tanto cuantitativos como experimentales, muestran que los estudiantes se apropiaron de conocimientos físicos básicos, además de desarrollar habilidades de pensamiento crítico, colaborativo y de resolución de problemas. El avance se evidenció en la manera en que los estudiantes analizaron los resultados, sugirieron mejoras al prototipo y definieron relaciones entre variables físicas. Al comparar los grupos con educación tradicional y los grupos con prácticas STEAM, se encontraron diferencias significativas en el rendimiento académico. En la Tabla 2, se puede observar que los estudiantes sometidos al enfoque STEAM obtuvieron una media de 8.61, mientras que el grupo tradicional obtuvo una media de 7.09. La moda de 9.0 en STEAM sugiere una tendencia a mejores notas; en cambio, la moda de 7.0 del grupo tradicional muestra un rendimiento más promedio. La desviación estándar fue ligeramente inferior en el grupo STEAM (0.84), lo que indica mayor homogeneidad en los resultados. Los estudiantes fueron capaces de realizar gráficas de calibración del sensor de temperatura LM35 usando regresión lineal, temperatura *vs.* velocidad del sonido y voltaje de salida *vs.* velocidad del sonido. Estas gráficas confirmaron experimentalmente las ecuaciones teóricas 1 y 2 en el prototipo [14], las cuales se muestran en la Figura 5.

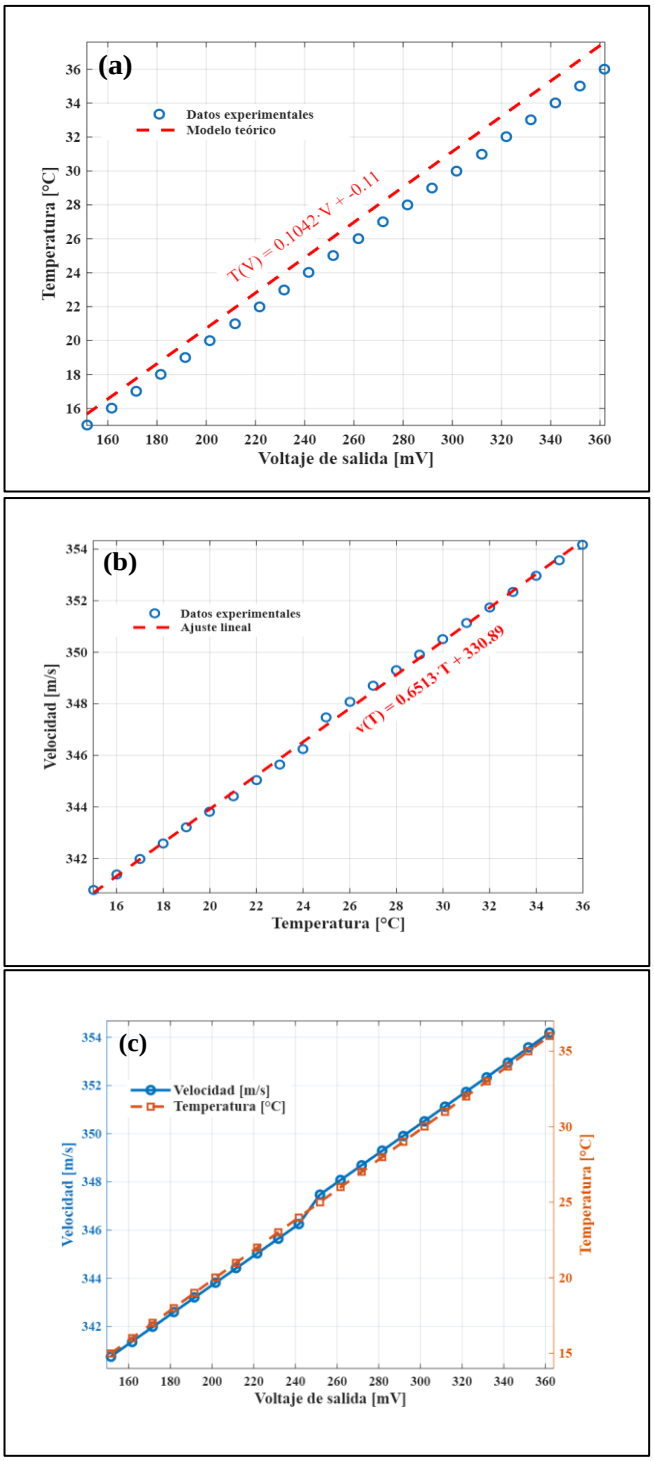


FIGURA 5. Gráficos generados por estudiantes. (a). Regresión lineal para la calibración del sensor de temperatura (b). Correlación entre temperatura *vs.* velocidad del sonido y (c). Relación entre voltaje de salida *vs.* temperatura y velocidad del sonido.

De las figuras se demuestra que la temperatura y la velocidad del sonido tienen una relación casi lineal. El cálculo estadístico, realizado en el software Origin 2025, dio como resultado una fuerte correlación entre las dos variables, $\boldsymbol{r} \approx 0.98$. Para lograr este resultado, se realizó primero una regresión lineal entre el voltaje y la temperatura medida por el sensor LM35, y luego se derivó la velocidad del sonido por el mismo procedimiento. Aunque la relación es indirecta, se demostró que la dependencia térmica está mostrada por una fuerte correlación positiva [15]. Para verificar la validez de los resultados, se utilizó una tercera ecuación para derivar el cálculo de la incertidumbre y se realizaron diez medidas bajo control [16]. Se hizo un análisis con un nivel de confianza del 95 % utilizando la distribución **t-Student**. La resolución del microcontrolador de 4.88 [mV/bit] fue tomada en cuenta. Las correcciones hechas por software también se utilizaron para compensar cualquier posible error sistemático, y se consideró la exactitud de los sensores y la estrategia de promedio de varias muestras para promediar el error aleatorio. En general, el prototipo mostró un porcentaje de error del 4.2 % al tomar la diferencia entre la velocidad experimental cuando los estudiantes asistían a la práctica y una velocidad teóricamente estimada según una ecuación empírica [17]. En un entorno educativo, es un margen de error completamente aceptable, especialmente si se considera la sensibilidad de los sensores y la naturaleza del aprendizaje experimental. Más bien, la discrepancia no fue un error, sino una oportunidad: les permitió a los alumnos encontrar una fuente potencial de error y, lo que es más importante, comparar un modelo físico con datos experimentales reales. En general, se podría decir que la metodología STEAM-Ludoplastia tuvo un impacto pedagógico significativo. Los estudiantes trabajaron no solo con materiales y probaron teorías físicas con experimentación directa, sino que también adquirieron habilidades interdisciplinarias, trabajaron juntos en equipos y se acostumbraron a ser creativos para encontrar soluciones. En otras palabras, este enfoque convirtió el estudio en actividad y pasión [18], mostrando exactamente lo que otros estudios han dicho: STEAM aumenta la motivación, la participación y el rendimiento del estudiante [19]. Por último, la prueba t-Student mostró que las diferencias entre las medias de los grupos no fueron casuales, sino que fueron estadísticamente significativas.

IV. CONCLUSIONES

Para concluir, el presente trabajo demuestra que la integración de la educación STEAM en las clases de Física de nivel medio superior no solo incrementa el rendimiento de los estudiantes, sino que también los motiva a adquirir habilidades interdisciplinarias, pensar críticamente y aprender de forma autónoma. Al encontrar apoyo en instrumentos computacionales como Fritzing, Proteus y MicroCode Studio, los alumnos pudieron crear prototipos económicos, fáciles de fabricar y funcionales para comprender tanto la física detrás de los fenómenos como para experimentar con ellos. En otras palabras, esta actividad no constituyó un engranaje técnico, sino que permitió a los alumnos estructuras concretas de conceptos. Y, tal como los resultados lo demuestran gráficamente, teniendo en cuenta que el grupo que trabajó bajo el metaparadigma STEAM sobrepasó en rendimiento al grupo tradicional hasta en un 30 % y la diferencia entre ambos fue estadísticamente significativa. Además, las mediciones empíricas permitieron confirmar que el incremento de la temperatura conduce a un incremento de la velocidad del sonido con un error cercano al 4.2 %. En un contexto educativo, este valor no es un problema, sino un recurso: permitió que los estudiantes

reflexionaran sobre las posibles fuentes de error y confirmaran con datos reales la validez de un modelo físico. La incorporación de tecnologías accesibles y programación básica dentro del aula demostró, además, su valor pedagógico. Estimuló la creatividad, la capacidad de resolver problemas y fomentó una colaboración más activa entre alumnos y profesores. Finalmente, este modelo tiene el potencial de replicarse en otras materias de ciencias exactas y naturales, fortaleciendo la conexión entre teoría y práctica. En última instancia, contribuye a formar estudiantes con habilidades científicas más sólidas, contextualizadas y aplicables al mundo real.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Guanajuato por el apoyo recibido para la realización de este trabajo, así como la facilitación de espacios para desarrollar cada prototipo educativo para implementar la educación STEAM.

REFERENCIAS

[1] Whitacre, I., Hensberry, K., Schellinger, J., & Findley, K. (2018). *Variations on play with interactive computer simulations: Balancing competing priorities*. International Journal of Mathematical Education in Science and Technology. https://doi.org/10.1080/0020739X.2018.1532536

[2] Pedaste, M., Lazonder, A., Raes, A., Wajeman, C., Moore, E., & Girault, I., *Empowering science teachers using technology-enhanced scaffolding to improve inquiry learning*. En J. Eberle, K. Lund, P. Tchounikine & F. Fischer (Eds.), Grand Challenge Problems in Technology-Enhanced Learning II (pp. 35–48). (Springer, USA, 2016). https://doi.org/10.1007/978-3-319-12562-6_4

[3] Perkins, K., Podolefsky, N., Lancaster, K., & Moore, E., *Creating effective interactive tools for learning: Insights from the PhET Interactive Simulations Project*. En T. Amiel & B. Wilson (Eds.), Proceedings of Ed Media 2012–World Conference on Educational Media and Technology (pp. 436–441). AACE (2012). https://www.learntechlib.org/primary/p/40781/

[4] García-Fuentes, O., Raposo-Rivas, M., & Martínez-Figueira, M. E., *El enfoque educativo STEAM: una revisión de la literatura*, Revista Complutense de Educación **34**, 1 (2023). https://dx.doi.org/10.5209/rced.77261

[5] López-Gamboa, M. V., Córdoba, C., & Soto, J., Educación STEM/STEAM: *Modelos de implementación, estrategias didácticas y ambientes de aprendizaje que potencian las habilidades para el siglo XXI*, Latin American Journal of Science Education **7**, 1–16 (2020). https://www.aacademica.org/marco.lopez/7

[6] Wieman, C., & Perkins, K., *A powerful tool for teaching science*, Nature Physics **2**, 290–292 (2006). https://doi.org/10.1038/nphys283

[7] Wieman, C., & Perkins, K., *Transforming physics education*, Physics Today, **58**, 36–4 (2005). https://doi.org/10.1063/1.2155756

[8] Proctor, T. M. Jr., *Sound speed measurements in solids: Absolute accuracy of an improved transient pulse method*. Journal of Research of the National Bureau of Standards-C, **75C** 1 (1971).

[9] Hannah, L., *A brief history of the speed of sound*, New Zealand Acoustics **19**, 4 (2006).

[10] Aguiar, C. E. & Pereira, M. M., *Using the sound card as a timer*. The Physics Teacher **49**, 33 (2011). https://doi.org/10.1119/1.3527753

[11] Courtney, M., & Courtney, A., *Acoustic measurement of potato cannon velocity*, The Physics Teacher **45**, 496 (2007). https://doi.org/10.1119/1.2798362

[12] Gómez-Tejedor, J. A., Castro Palacio, J., & Monsoriu, J., *Direct measurement of the speed of sound using a microphone and a speaker*, Physics Education **49**, 310–313 (2014). https://doi.org/10.1088/0031-9120/49/3/310

[13] Hellesund, S., *Measuring the speed of sound in air using a smartphone and a cardboard tube*, Physics Education **54**, 035015 (2019). https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab0e21

[14] Berg, A. & Courtney, M., *Echo-based measurement of the speed of sound*. arXiv preprint, arXiv:1102.2664 (2011). https://doi.org/10.48550/arXiv.1102.2664

[15] Tsujimoto, Y. et al., *Measurement of temperature dependence of sound velocity in biological tissues*, Japanese Journal of Applied Physics 58, SGGE01 (2019). https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab12cb

[16] Makar, A., *Simplified method of determination of the sound speed in water on the basis of temperature measurements and salinity prediction for shallow water bathymetry*. Remote Sensing **14**, 636 (2022). https://doi.org/10.3390/rs14030636

[17] Cramer, O., *The variation of the specific heat ratio and the speed of sound in air with temperature, pressure, humidity, and CO_2 concentration*, Journal of the Acoustical Society of America **93**, 2510–2516. (1993). https://doi.org/10.1121/1.405827

[18] Trejo, G. A. T., Gutú, J. D., Espinoza, E. G., & González, F. E. C., *STEAM integrada con metodologías activas para mejorar el rendimiento académico y percepción de estudiantes en educación primaria*, Ciencia Latina: Revista Multidisciplinar **8**, 8670–8687 (2024). https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8il

[19] Guanotuña Balladares, G. E., et al., *Adaptación de la metodología STEM-STEAM en la educación pos pandemia: Un enfoque integral para la recuperación académica*, Revista InveCom **4**, 2 (2024). https://doi.org/10.5281/zenodo.10694156

Video análisis y parámetros físicos de carrera en luchadores profesionales antes de lanzarse del ring

ISSN 1870-9095

Vicente Torres Zúñiga
Escuela Nacional de Ciencias Forenses, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica s/n, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510, México, Cd. Mx.

E-mail: vicentetorres@enacif.unam.mx

(Recibido el 29 mayo de 2025, aceptado el 2 de septiembre de 2025)

Resumen

En este estudio se midieron la velocidad, energía cinética en carrera y fuerza de choque contra cuerdas en profesionales de lucha libre mexicana durante la maniobra de lanzarse fuera del ring, conocida como "tope suicida entre segunda y tercera cuerda". Utilizando video-análisis con software libre, se examinaron 15 escenas grabadas desde un ángulo cenital, donde los atletas corren, impactan las cuerdas del cuadrilátero y se impulsan para salir del ring. Los movimientos se modelaron mediante ajustes lineales que revelan fases de movimiento rectilíneo uniforme antes y después del choque con las cuerdas, con errores menores al 10 % y factores de correlación superiores a 0.97. En lapsos entre 0.66 a 1.782 s, se registraron magnitudes de la velocidad entre 3.67 y 5.66 m/s y energías cinéticas de 0.60 a 1.36 kJ, comparables con otras disciplinas deportivas. Además, se calculó la fuerza máxima ejercida contra las cuerdas, con un valor máximo de 2.56 kN, inferior al umbral para fracturas, lo que indica que la maniobra es segura para los atletas. Este trabajo destaca la aplicación del análisis biomecánico a un deporte popular poco estudiado en esta área, demostrando la viabilidad de usar videos públicos y herramientas accesibles para medir parámetros físicos. Los resultados ofrecen una base para futuras investigaciones y pueden servir para introducir conceptos de física y biomecánica en contextos educativos. Se enfatiza la multidisciplinariedad del enfoque, vinculando deporte, cultura popular y ciencia, y se plantea la necesidad de estudios experimentales directos y análisis de otras maniobras características de la lucha libre profesional.

Palabras clave: biomecánica, video-análisis, lucha libre, movimiento rectilíneo uniforme, física de deportes.

Abstract

In this study, we measured running speed, kinetic energy, and impact force against the ropes in professional Mexican wrestlers during the maneuver known as the "suicide dive between the second and third rope." Using video analysis with open-source software, we examined fifteen scenes recorded from an overhead angle, where athletes ran, hit the ring ropes, and propelled themselves out of the ring. We modeled the movements with linear fits that revealed phases of uniform rectilinear motion before and after the rope impact, with errors below 10% and correlation factors above 0.97. Within time intervals ranging from 0.66 to 1.782 s, we recorded speeds between 3.67 and 5.66 m/s and kinetic energies from 0.60 to 1.36 kJ, values comparable to those in other sports. We also calculated the maximum force exerted against the ropes, finding a peak of 2.56 kN—below the fracture threshold—which indicates that the maneuver is safe for the athletes. This work highlights the application of biomechanical analysis to a popular sport that has received little attention in this area, demonstrating the feasibility of using public videos and accessible tools to measure physical parameters. The results provide a basis for future research and can help introduce physics and biomechanics concepts in educational contexts. The study emphasizes the multidisciplinary nature of the approach, linking sport, popular culture, and science, and calls for direct experimental studies and the analysis of other characteristic maneuvers in professional wrestling.

Keywords: biomechanics, video analysis, wrestling, uniform rectilinear movement, physics of sports.

I. INTRODUCCIÓN

Gracias a las investigaciones en el área de las ciencias sociales, se reconoce mundialmente a la lucha libre profesional como un elemento sustancial en la cultura popular mexicana [1, 2]. De hecho, fue declarada patrimonio cultural intangible de la Ciudad de México [3]. Se pueden enumerar tres razones para sostener esta afirmación. Primero, cuenta con una tradición histórica. En México, las primeras funciones de este deporte-espectáculo datan de alrededor de 1920. De hecho, entre todas las compañías del mundo, México cuenta con la empresa más longeva de lucha libre, con más de 92 años desde su fundación: el hoy llamado Consejo Mundial de Lucha Libre (CMLL), actualmente, goza una loable popularidad internacional. Segundo, presenta personajes culturalmente trascendentales [4]. Muchos luchadores han alcanzado fama internacional tanto en el ring como en medios de comunicación; tales como el cine, la televisión, la historieta, entre otros formatos [5, 6]. Un claro ejemplo es el gladiador llamado: el Santo; quien encarnó su personaje entre 1942 y 1984, filmando en ese transcurso más de 53 películas taquilleras, consideradas de culto en varias

naciones [7]. Y tercero, cuenta con un estilo distintivo fácil de reconocer. Por ejemplo, la mayoría de sus luchadores portan máscaras coloridas; estas les permiten desarrollar mejor sus personajes como representaciones del bien o del mal [1]. De hecho, los encuentros donde se apuesta la máscara se consideran especiales. En lo referente a sus movimientos en combate, cuenta con intrincadas maniobras de agarre (llaves y contrallaves) utilizadas para someter al contrincante o para colocarlo de espalda sobre la lona. Además, usualmente basados en el uso de las cuerdas del ring, presenta acrobacias y saltos arriesgados dentro y fuera del cuadrilátero. Con todos estos componentes, algunos autores consideran a la lucha libre profesional como el segundo deporte-espectáculo más popular de México, después del futbol soccer [1].

En contraste, la lucha libre mexicana ha sido poco estudiada por disciplinas como la biomecánica. Ciertamente, encontramos literatura especializada sobre actividades deportivas (carrera, salto, etc.), incluso enfocada en lucha olímpica [8] y las artes marciales [9], donde además se exponen tanto la técnica como formas de prevenir lesiones ante diferentes maniobras [10]. Así también, múltiples publicaciones exponen el desarrollo cinemático y dinámico de una acrobacia circense o de gimnasia olímpica [11]. Sin embargo, es exigua la información biomecánica de ciertas acciones exclusivas de la lucha libre profesional; tal es el caso del llamado: "tope suicida entre segunda y tercera cuerdas del ring". Son pocos los datos sobre la velocidad o la energía cinética desarrollada al realizar la acción.

Ante la falta de experimentos, donde se controlan las variables en instalaciones especializadas, proponemos utilizar la observación *in-situ*; utilizando grabaciones de los combates para estudiar parte de la biomecánica de los luchadores. Esto mediante la video-transmisión por medio de internet, estrategia didáctica que tiende a crecer día con día al demostrar resultados satisfactorios en el aprendizaje de la física [12, 13]. Así, es posible encontrar movimientos o maniobras adecuados para realizar estudios sistemáticos. Por otro lado, de forma gratuita y con interfaces cómodas, se encuentran disponibles varios programas de cómputo que permiten el análisis biofísico de tales videos.

Después de realizar una búsqueda en la literatura deportiva y en biomecánica especializada, consideramos que es la primera vez que se obtienen parámetros físicos en el proceso de un movimiento de lucha tan emblemático como el "tope suicida". Aunque es oportuno mencionar que en el blog personal del autor se presentó sucintamente una medida preliminar de la velocidad de un solo luchador, en unas condiciones de procesamiento de video muy diferentes a las aquí expuestas [14].

Consideramos que esta breve contribución puede ser más que una curiosidad cultural. Puede alcanzar a detonar investigaciones más profundas en biomecánica, sobre el desarrollo de movimientos distintivos entre estos atletas. El estudio de los luchadores también puede ser un pretexto evocador para introducir en diferentes cursos tanto temas fundamentales de física mecánica básica, así como de biomecánica.

II. MÉTODOS Y MATERIALES

Realizando una búsqueda de material multimedia por Internet, en la plataforma YouTube, se localizó un canal que transmite combates de lucha libre profesional mexicana [15]. Los videos muestran escenas particularmente adecuadas para un video-análisis sistemático: cuentan con una cámara fija en ángulo cenital, justo arriba del cuadrilátero. Las video-imágenes cubren completamente el movimiento de los gladiadores. Aunque presentan una ligera distorsión en el campo visual, típica de los sistemas ópticos comerciales con aberraciones en forma de "barril", esta es tolerable para el mercado y puede corregirse para la actividad mediante una calibración longitudinal adecuada. Mediante esta misma cámara, se registraron en varias ocasiones a los luchadores corriendo e impactando en las cuerdas del ring, y luego continuando con su carrera. Después de un cambio de escena, muestran el salto, su salida del ring y su impacto sobre el contrincante. Para esta contribución, nuestro interés se centró en la acción de correr e impactar con las cuerdas para cambiar de dirección, observando toda la escena en ángulo cenital.

En una computadora personal, descargamos los videos correspondientes a 15 escenas de la acción de carrera. La base de datos se puede consultar en:
https://drive.google.com/drive/folders/1n2IHPTw3d6zNKP8H9LpfccxEHD07AzQ7?usp=sharing

Después, las escenas fueron preparadas y analizadas mediante el software Tracker, una herramienta gratuita, de video-análisis digital y de construcción de modelos físicos [16]. Es oportuno mencionar que este programa se diseñó con fines pedagógicos. Si bien existe software más especializado para analizar movimientos biomecánicos, consideramos que Tracker es la mejor opción para que otros investigadores (especialmente estudiantes) comprueben la información que recabamos y aquí presentamos.

Todos los videos fueron sometidos al mismo acondicionamiento de pre-captura de datos. Primero, aseguramos que las tomas fueran fijas, que los movimientos comenzaran de izquierda a derecha (definiendo la dirección positiva del vector), y luego de derecha a izquierda (definiendo la dirección negativa); antes y después del impacto con las cuerdas, respectivamente. En un par de casos (ambos para el luchador *Xtreme* Tiger) se requirió girar 90º la vista del video. Después, el eje coordenado se colocó del lado izquierdo del ring, sobre la cuerda superior, al nivel del movimiento del luchador. Finalmente, la llamada "vara de calibración", que permite la conversión de píxeles a metros (por medio del ajuste de la medida longitudinal, respecto a un patrón de referencia), se colocó sobre las cuerdas superiores de izquierda a derecha. De acuerdo con información de la empresa que administra la arena (el CMLL) estas dimensiones corresponden a 6.0 m. Verificamos que la tasa de muestreo del video fuera constante y normal: de 33 cuadros por segundo. En tales condiciones fue innecesario utilizar filtros de perspectiva o de corrección de movimientos laterales o de acercamiento de la cámara. Además, por el contraste entre el ring y la vestimenta de los atletas, tampoco se necesitó emplear filtros para diferenciar el fondo y la región de interés. En resumen, los videos presentan

condiciones idóneas para ser analizados y obtener información biomecánica precisa.

El registro de datos se realizó manualmente. Se rastrearon los puntos más cercanos al centro de masa del atleta, que a la vez fueran claramente distinguibles durante su carrera. Por las condiciones del video, el punto a seguir fue cerca del cuello, sobre la clavícula izquierda del luchador. Esto permitió obtener datos representativos del movimiento y un error mínimo de perspectiva. La Figura 1 ilustra los elementos más importantes en el acondicionamiento y captura de coordenadas en función del tiempo. La misma figura presenta la posición del eje coordenado, la vara de calibración, y en parte, se muestran los puntos registrados (de ilustrar todos, con esas dimensiones, se empalmarían los puntos). En este caso, la carrera (de derecha a izquierda) corresponde al luchador conocido como Atlantis. Finalmente, los datos se registraron en una tabla de posición en función del tiempo y se exportaron para su posterior análisis matemático en un software de hoja de cálculo.

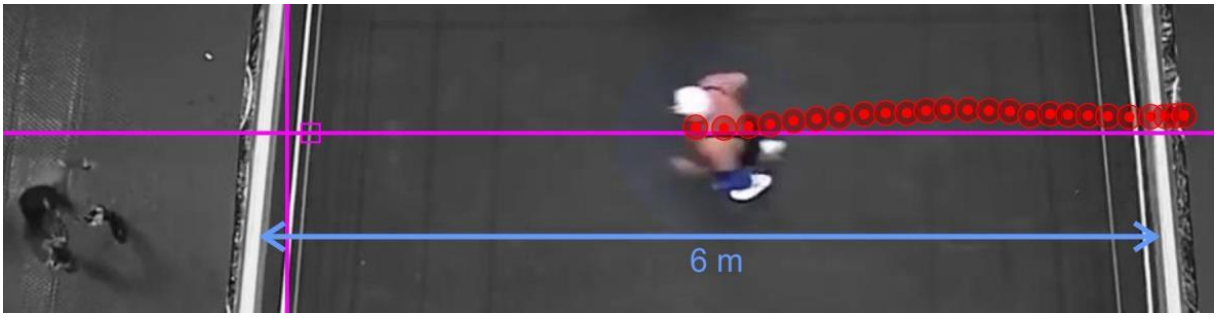


FIGURA 1. Escena cenital donde el luchador Atlantis prepara su lance entre segunda y tercera cuerda del cuadrilátero. Los puntos rojos marcan la trayectoria cuasi-recta de su carrera. También se exhibe la posición del eje coordenado y de la vara de calibración. Imagen editada por el autor.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra la curva típica del movimiento completo. Más aún, se marcan con rectas los ajustes lineales en las maniobras de los luchadores. Es decir, los siete luchadores, en las 15 escenas mostraron la misma tendencia: una carrera en sentido contrario del rival, el choque de espaldas con las cuerdas, y la continuación de la carrera para salir saltando del encordado.

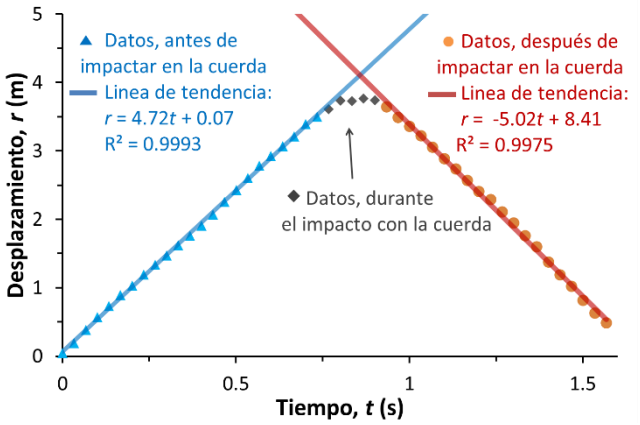


FIGURA 2. Gráfica del movimiento del luchador al correr. Los datos presentan tres etapas: **1)** un comportamiento lineal creciente, donde el atleta corre hacia las cuerdas, **2)** la presencia de una aceleración por el impacto del gladiador contra las cuerdas y **3)** el deportista corre en dirección de su rival, antes de saltar e impactar sobre su contrincante. Figura del autor.

Así, de cada gráfica se obtuvieron dos ajustes lineales por el método de mínimos cuadrados [17]. Interpretamos la ecuación ajustada de la siguiente manera: el desplazamiento es una función dependiente del tiempo $r(t)$, donde la pendiente representa la velocidad lineal v registrada durante ese lapso. Es decir, es una velocidad estadísticamente representativa de la serie de puntos. Mientras que la variable independiente r_0 indica que tan lejos comienza el registro de puntos respecto al origen del eje coordenado. Este dato es de poca importancia en el estudio biomecánico; pues a diferencia de la rapidez, es dependiente de la colocación del eje coordenado. En términos matemáticos lo podemos escribir de la siguiente manera:

$$r(t) = vt + r_0 \tag{1}$$

De tal modo, se obtuvieron dos velocidades una de ida (antes de chocar con las cuerdas) y otra de regreso (después de chocar con las cuerdas). Se calculó la rapidez antes y después de impactar con las cuerdas, también se registró los factores de correlación de los ajustes, así como el número de datos utilizados para cada cálculo, el equivalente en diferencia de tiempo del número de datos. Todo esto lo presentamos en la Tabla AI, que aparece en el apéndice de este documento.

Por otro lado, los datos que no pertenecen a las rectas son parte de una curva que contiene información sobre el cambio de velocidad en el tiempo. Es decir, de esta curva se puede obtener la fuerza con la que los luchadores impactan en las cuerdas para después continuar su maniobra. Su velocidad calculada inicial, al impactar en las cuerdas, disminuye a cero. Así, en la misma Tabla AI, también se muestra el tiempo en que la velocidad inicial disminuye hasta cero cuando el luchador interacciona con las cuerdas. Por razones metodológicas es importante mostrar la Tabla AI, puesto que permiten a otros investigadores repetir el proceso expuesto. Sin embargo, por la cantidad de datos este cuadro puede ser abrumador y confuso para algunos lectores que se inician en el análisis de datos. Por ello, en la Tabla I se presenta un

resumen de los datos más importantes obtenidos, los valores mínimos y máximos registrados.

Es conveniente explicar el significado de algunos datos de las Tablas AI y I. Por ejemplo, todos los tiempos de carrera registrados fueron significativamente inferiores a los 30 s. Los tiempos de carrera están lejos del umbral fisiológico en que se favorece la acumulación intramuscular de lactato, lo que se asocia con una disminución en la capacidad para sostener una velocidad constante debido a la fatiga metabólica [18, 19, 20]. Por otro lado, resaltar que se utilizó una cantidad suficiente de datos (10 como mínimo) para obtener las líneas de tendencia [17]. Los factores de correlación muestran que el ajuste es adecuado, en el peor de los casos se registró un ajuste con casi $R^2 = 0.97$, mientras que se obtuvieron más de quince ajustes que superan el valor de $R^2 = 0.999$ en la correlación. Recordando que el valor ideal del factor de correlación es uno; podemos afirmar que los ajustes lineales representan un buen modelo del movimiento en carrera de estos luchadores [17]. Más aún, tanto por la trayectoria (comprobable visualmente en el video) como por el buen ajuste del modelo lineal de la Ec. 1, podemos afirmar que la velocidad es constante, por lo que en cada etapa de la carrera del luchador corresponde a un movimiento rectilíneo uniforme.

Después de reordenar los datos, se calculó el promedio de la rapidez (después de impactar en la cuerda), así como la desviación estándar por cada luchador; presentando la información de mayor a menor. Incorporando la edad y la masa *m* de cada luchador, según los datos que proporciona la empresa promotora de luchas [4]. Además de calcular la energía cinética E_c antes del salto fuera del ring ($E_c=½mv^2$). La Tabla II exhibe esa información con los valores mínimo y máximo resaltados en negritas.

De la Tabla II se observa que la energía cinética alcanza valores de 0.60 a 1.36 kJ. Comparando estas cifras con otras actividades deportivas se aprecia mejor su significado [10, 21]. La Tabla III muestra diferentes actividades y los parámetros físicos correspondientes. Se observa que, dentro del orden de magnitud, son coherentes con los valores calculados. Es decir, las energías son inferiores a algunas actividades de alto impacto, pero son muy superiores a movimientos cotidianos, como el acto de caminar [21].

TABLA I. Datos extremos obtenidos de las mediciones al realizar ajuste a rectas.

Parámetro	*Registro mínimo*	*Registro Máximo*
Rapidez antes de las cuerdas (m/s)	3.67	5.66
Rapidez después de las cuerdas (m/s)	4.14	5.93
Factor de correlación, R^2	0.9742	0.9996
Número de datos para los ajustes lineales	10	33
Tiempo de carrera (s)	0.66	1.089
Tiempo de frenado con las cuerdas (ms)	50	200

TABLA II. Datos promedio de los luchadores al realizar la maniobra de salto entre segunda y tercera cuerda. Algunos nombres de luchadores cuentan con las siguientes anotaciones: **1)** Para realizar un promedio, recuperamos la medición de la rapidez (4.44 m/s) del luchador que publicó el autor en su blog personal [14]. Solo con el fin de presentar más información representativa. **2)** En realidad, el luchador no salta para salir del ring, él realiza un deslizamiento con las piernas hacia adelante. Además, por el momento, solo contamos con una escena de su maniobra. Por ello, consideramos dejarlo parcialmente fuera de la lista.

#	*Nombre del luchador*	*Edad (años)*	*Masa (kg)*	*Promedio de la rapidez (m/s)*	*Desviación estándar*	*Energía cinética (kJ)*	*Fuerza máxima en las cuerdas (kN)*
1	Volador Jr.	35	87	**5.26**	0.50	**1.36**	1.60
2	Máscara dorada	**28**	80	5.10	**1.07**	0.91	1.89
3	La máscara	33	92	4.94	0.19	1.02	1.69
4	Caristico[1]	33	75	4.87	0.61	1.07	**2.56**
5	Xtreme Tiger	35	**70**	4.90	**0.18**	1.12	1.87
6	Atlantis	**54**	89	**4.48**	0.39	**0.60**	**1.14**
7	Último guerrero[2]	44	**95**	5.25	–	1.31	2.08

A. Sobre la fuerza en la colisión

Se estimó la fuerza máxima ($F = m \cdot \Delta v/\Delta t$) que experimentan los luchadores al chocar contra las cuerdas del ring, como una parte del movimiento que termina con su salida del encordado. Esta cifra considera la masa y la velocidad del luchador, además del tiempo registrado de interacción con las cuerdas, ver Tabla IA. Así, la fuerza máxima que experimentaron los gladiadores fue de 2.56 kN, valor muy inferior al que puede causar una fractura particular: ~50 kN [22]. Siendo así, esta comparación nos ubica en el evidente contexto, como se observa en los videos: el choque contra las cuerdas no causa daño en los atletas. Con todo se puede complementar este estudio con experimentos o análisis que consideren que la masa es una estimación, por ejemplo utilizando método Montecarlo, como se ha reportado en otros trabajos [23].

B. El impulso con las cuerdas

Finalmente, en el 53 % de las escenas los luchadores aumentan su rapidez después de impactar en las cuerdas. Esto significa que no aumentan su velocidad por efecto físico de la colisión con la cuerda elástica. De lo que se infiere, ellos aumentan o disminuyen su velocidad por voluntad propia.

Posiblemente toda la maniobra es parte de su entrenamiento, donde ellos mismos requieren un tiempo suficientemente amplio para ejecutarla correctamente, además de brindar elementos espectaculares a su afición. Este comportamiento de ejecución explicaría porque aparece una peculiar "uve" invertida como gráfica del movimiento completo del luchador.

IV. SOBRE ÉTICA DE DATOS PERSONALES EN VIDEOS PÚBLICOS

Coincidimos plenamente en que toda investigación que involucre a personas debe considerar los principios éticos correspondientes. En el presente estudio no se realizaron grabaciones propias, entrevistas, experimentos, ni interacciones directas con los atletas. El análisis se ejecutó únicamente utilizando material audiovisual de acceso libre, disponible públicamente en la plataforma YouTube, subido por canales que cuentan con autorización para transmitir dichos encuentros deportivos. Estos videos son parte de espectáculos públicos, grabados y difundidos con fines de entretenimiento, y en ellos los luchadores participan en calidad de figuras públicas. Más aún, ellos interpretan personajes.

De acuerdo con guías internacionales de ética en investigación y con la definición de investigación con "datos secundarios de dominio público" (por ejemplo, la *Declaration of Helsinki*, el *U.S. Code of Federal Regulations* 45 CFR 46, y las recomendaciones de las recomendaciones del comité ética de la Escuela Nacional de Ciencias Forenses de la UNAM) [24, 25], el uso de material público en el que las personas no pueden ser identificadas más allá de su rol profesional no requiere consentimiento informado adicional, siempre que:

1. No se revelen datos personales privados,
2. No se ponga en riesgo la integridad, seguridad o reputación de las personas analizadas,
3. No se manipule el contenido de forma que genere un contexto distinto al original.

En nuestro caso, los datos presentados derivan exclusivamente de parámetros físicos calculados (velocidad, energía cinética, fuerza estimada en cuerdas), sin juicios de valor sobre el desempeño o estado físico o de salud de los atletas. No se incluyen nombres completos, domicilios, datos médicos, ni ninguna información privada; únicamente se mencionan los nombres artísticos ya de dominio público. De hecho, muchos de los luchadores portan una máscara, lo que impide su identificación facial.

Este estudio limita a un análisis observacional no intrusivo en eventos públicos, por lo que reconocemos que estudios futuros que impliquen mediciones directas o material no público deberán gestionar la aprobación ética correspondiente y el consentimiento informado de los participantes.

TABLA III. Parámetros biomecánicos de otras actividades físicas [21, 22, 26], que permiten comparar los resultados obtenidos con los luchadores.

Deportista	*Peso (kg)*	*Rapidez (m/s)*	*Energía (kJ)*
Jugador de futbol americano	90	7.6	2.60
Velocista olímpico en *sprint*	63.5	10.6	3.57
Caminata normal	70	1.4	0.07

V. CONCLUSIONES Y PROSPECTIVA

Este estudio constituye un primer acercamiento sistemático al análisis biomecánico de una maniobra emblemática de la lucha libre profesional mexicana: el "tope suicida entre segunda y tercera cuerda". A través de un procedimiento accesible —basado en video-análisis con software pedagógico gratuito— se obtuvieron parámetros físicos relevantes, como la rapidez promedio, la energía cinética y la fuerza ejercida en la interacción con las cuerdas.

Los resultados muestran que los luchadores pueden alcanzar rapideces cercanas a 6 m/s y energías cinéticas de hasta 1.36 kJ, magnitudes comparables con actividades deportivas de alto rendimiento y muy superiores a movimientos cotidianos. Asimismo, se estimó una fuerza máxima de 2.56 kN en la colisión con las cuerdas, valor muy por debajo de umbrales de lesión ósea, lo cual explica por qué la maniobra puede ejecutarse repetidamente sin consecuencias traumáticas aparentes. Un hallazgo adicional es que en más de la mitad de las escenas los atletas incrementan su velocidad tras el impacto, no por el efecto físico de la cuerda elástica, sino por decisión motora, lo que

sugiere un componente estratégico y de entrenamiento orientado al espectáculo.

Desde el punto de vista metodológico, se confirma la pertinencia de emplear videos públicos en línea y herramientas digitales abiertas como recurso didáctico y científico. Ello permite introducir a estudiantes en el análisis de movimientos complejos mediante conceptos fundamentales de la mecánica clásica —velocidad, energía y fuerza— en un contexto culturalmente significativo y motivador. De esta manera, la lucha libre puede fungir como puente entre la física, la biomecánica y la educación, facilitando la comprensión de la ciencia a través de fenómenos del entorno social cercano.

Finalmente, reconocemos que este trabajo es exploratorio y limitado a un conjunto reducido de escenas. Futuras investigaciones deberán incorporar técnicas instrumentales más precisas, ampliar el número de atletas y maniobras estudiadas, e integrar mediciones directas en entornos controlados. Con ello, será posible consolidar un campo de análisis biomecánico aplicado a deportes-espectáculo y, al mismo tiempo, enriquecer estrategias pedagógicas que promuevan el aprendizaje activo de la física y la valoración crítica de la cultura popular.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al financiamiento de los programas: UNAM-PAPIME- PE115519 y UNAM-CATIC-2025.

REFERENCIAS

[1] Glenday, D., *Professional wrestling as culturally embedded spectacles in five core countries: the USA, Canada, Great Britain, Mexico and Japan*, Revue de Recherche en Civilisation Américaine **4**, (2013). https://journals.openedition.org/rrca/548

[2] Levi, H., *Sport and melodrama: The case of Mexican professional wrestling*, Social Text. **50**, 57-68 (1997).

[3] Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Decreto por el que se Declara Patrimonio Cultural Intangible a la Lucha Libre en la Ciudad de México: p. 3-6 (2018), https://www.cultura.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/0667-18

[4] Consejo Mundial de Lucha Libre. Sitio Web Oficial del CMLL. [Online]; (2016). Acceso 10 de agosto de 2025. Disponible en: http://cmll.com/.

[5] Criollo, R., Návar, J. X., Aviña, R., *¡Quiero ver sangre!: Historia ilustrada del cine de luchadores Ciudad de México*, (UNAM, Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial, México, 2018).

[6] Rodriguez, E. R., *El Santo vs. Mystery Science Theater 3000: Lucha Libre's Transnational Journey into American Popular Culture*, The Velvet Light Trap. **85**, 43-52 (2020).

[7] Internet Movie Database. IMBD, filmografía del Santo. [Online], (2025). Acceso 1 de 8de 2025. Disponible en: http://www.imdb.com/name/nm0763803/?ref_=fn_al_nm_1

[8] Carle, M., *Olympic Wrestling and Angular Momentum*, Physics Teacher **26**, 92-94 (1988).

[9] Gianino, C., *Physics of Karate: Kinematics analysis of karate techniques by a digital movie camera*, Latin-American Journal of Physics Education **4**, 5 (2010).

[10] Izquierdo, M., *Biomecánica y Bases Neuromusculares de La Actividad Física y El Deporte*, Cult. Cienc. Deporte **5**, 57-58 (2010).

[11] Hong, Y., Brüggemann, G. P., *A three dimensional simulation model for the development of new airborne movements in gymnastics, diving and acrobatics*, Journal of Biomechanics **25**, 777 (1992).

[12] Villacreses-Zambrano, J. P., Rosado-Cusme, K. A., Cevallos-Reyes, C. B., *Tracker para la enseñanza de la Física I: una experiencia con estudiantes de educación superior*, MQRInvestigar **8**, 5765-5779 (2024).

[13] Santillán, J. J. P., Brito, J. L. S., *Efectividad del uso de la herramienta Tracker en la enseñanza universitaria de física: una revisión sistemática*, Reincisol **3**, 6148-6168 (2024).

[14] Torres, V., *Caristico alcanza los 4.4 m/s cuando hace un tope suicida*. [Online]; (2015). Acceso 10 de agosto de 2025. Disponible en: https://vicente1064.blogspot.com/2015/12/caristico-alcanza-los-44-ms-cuando-hace.html.

[15] Compañia Lucha Libre Elite. https://www.youtube.com/@LigaEliteLucha. [Online]; (20169. Acceso 10 de agosto de 2025. Disponible en: https://www.youtube.com/@LigaEliteLucha.

[16] Brown, D., *Tracker, web start video experiments*. [Online]; (2009). Acceso 10 de agosto de 2025. Disponible en: https://opensourcephysics.github.io/tracker-website/.

[17] Baird, D. C., *Experimentation an Introduction to Measurement Theory and Experiment Design*. 3rd ed. (Creative Media Partners, México, 2021).

[18] Haase, R., Dunst, A. K., Nitzsche, N., *Blood lactate accumulation during maximal cycling sprints and its relationship to sprint performance characteristics*, European Journal of Applied Physiology **125**, 2197–2207 (2025).

[19] Meixner, B. J., Nusser, V., Koehler, K., Sablain, M., Boone, J., Sperlich, B., *Relationship of peak capillary blood lactate accumulation and body composition in determining the mechanical energy equivalent of lactate during sprint cycling*, European Journal of Applied Physiology **124**, 3399-3407 (2024).

[20] Ji, S., Keller, S., Zwingmann, L., Wahl, P., *Modeling lactate threshold in young squad athletes: influence of sex, maximal oxygen uptake, and cost of running*, European journal of applied physiology **123**, 573-583 (2023).

[21] Knudson, D., *Fundamentals of Biomechanics*, 3rd ed. (Springer, USA, 2021).

[22] Piña Barba, M. C., *La física en la medicina*, (Fondo de Cultura Económica, México, 2013).

[23] Torres, V., *Videoanálisis y técnica Monte Carlo para calcular la cota máxima de la fuerza de una patada*, Cultura Científica y Tecnológica **19**, 7 (2022).

[24] Comité de Ética de la ENaCiF. *Recomendaciones del Comité de Ética de la ENaCiF para las actividades de enseñanza y divulgación*. Ciudad de México: UNAM, Escuela Nacional de Ciencias Forenses.

[25] Asociación Médica Mundial. Declaración de Helsinki de la AMM – *Principios éticos para las investigaciones médicas en seres humanos*.
[26] Mego, C. L., Parada, D. L., *Modelación matemática en el aula: La velocidad de atletas de alto rendimiento en una carrera de 100 metros*, RIME **1**, 39-67 (2024).

APÉNDICE A

TABLA A1. Datos obtenidos de las mediciones de la carrera de luchadores. Tabla elaborada por el autor.

Evento	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**
Luchador	Volador Jr.			Máscara dorada		Xtreme Tiger			La máscara		Caristico	Último Guerrero			Atlantis
Antes de las cuerdas															
Rapidez (m/s)	**5.59**	4.83	4.2	**3.3**	4.78	-	5.66	4.71	4.7	4.21	5.34	5.25	4.03	3.78	3.67
R^2	0.9987	0.9996	0.9979	**0.9742**	0.9976	-	0.9989	0.9993	0.9994	0.9968	0.9964	0.9995	0.9999	0.9978	0.9996
Núm. puntos	26	38	48	27	28	-	20	46	38	22	34	24	38	31	20
Lapso (s)	0.858	1.254	1.584	0.891	0.924	-	0.66	1.518	1.254	0.726	1.122	0.792	1.254	1.023	0.66
T. en curva (s)	0.363	0.242	0.212	**0.424**	0.121	-	0.212	0.272	0.242	**0.091**	0.242	0.181	0.272	0.363	0.242
Después de las cuerdas															
Rapidez (m/s)	5.32	4.77	**5.93**	5.03	5.85	4.34	4.77	5.02	4.8	5.07	5.29	4.64	4.39	4.9	**4.14**
R^2	0.9992	0.9993	0.9989	0.9984	0.9993	0.997	0.9993	0.9975	0.9993	0.9977	0.9958	0.998	0.999	**0.9994**	0.9994
Núm. puntos	32	42	**54**	28	20	23	36	40	34	29	26	36	38	33	25
Lapso (s)	1.056	1.386	1.782	0.924	0.66		1.188	1.32	1.122	0.957	0.858	1.188	1.254	1.089	0.825

El problema del potencial eléctrico para una caja cuadrada finita

ISSN 1870-9095

Andrés González García[1], Beatriz Rubio Campos[2], Gerardo González García[3], Juan J Rosales García[4]

[1]*Universidad de Guanajuato, Escuela de Nivel Medio Superior Centro Histórico León, Av. Álvaro Obregón No. 308, Col. Centro, C.P. 37000, León, Gto. México.*
[2]*Universidad de Guanajuato, Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato. Alameda No. 100; Colonia Centro; C.P. 36000; Guanajuato, Gto., México.*
[3]*Universidad de Guanajuato, División de Ciencias Naturales y Exactas Noria Alta s/n; C.P. 36050; Guanajuato, Gto., México.*
[4]*Universidad de Guanajuato, Carretera Salamanca-Valle de Santiago Km. 3.5 + 1.8; Comunidad de Palo Blanco; Salamanca, Gto. México.*

E-mail: andres.gonzalez@ugto.mx

(Recibido el 4 junio de 2025, aceptado el 3 de octubre de 2025)

Resumen

En este estudio experimental y numérico se muestra una de las aplicaciones de la ecuación de Laplace, cuando se conocen las condiciones de límite del potencial eléctrico. Esta labor tiene como objetivo fomentar el razonamiento crítico de los alumnos, a través de la implementación del aprendizaje STEAM (abreviatura de Ciencia, Tecnología, Artes y Matemáticas) y la ludoplastia, técnicas en constante evolución en los programas de ciencias exactas. Se pueden desarrollar soluciones para el problema de la caja infinita, tanto para una mejor comprensión de los campos electromagnéticos impartidos en el nivel medio superior (NMS) como en el nivel superior (NS).

Palabras clave: Ecuación de Laplace, método interactivo, diferencias finitas.

Abstract

In this experimental and numerical study, one of the applications of Laplace's equation is shown when the boundary conditions of the electric potential are known. This work aims to foster students' critical thinking through the implementation of STEAM learning (Science, Technology, Arts, and Mathematics) and ludoplasty, techniques that are constantly evolving in exact sciences programs. Solutions can be developed for the infinite box problem, both for a better understanding of electromagnetic fields taught at the upper secondary level (NMS) and at the higher education level (NS).

Keywords: Laplace's equation, interactive method, finite differences.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio del campo electromagnético y su relación con el potencial eléctrico es fundamental en los cursos de Nivel Medio Superior y Nivel Superior, ya que permite comprender cómo las cargas interactúan entre sí y generan campos electromagnéticos. Este análisis es clásico: primero se calcula el campo eléctrico mediante sumas o integrales sobre configuraciones de carga, como distribuciones puntuales o lineales. Posteriormente, mediante la ley de Gauss, se determina la densidad de desplazamiento eléctrico **D** y el campo eléctrico **E**. Aunque estos enfoques son útiles para obtener información desde distintas perspectivas, resultan limitantes en la práctica debido a la dificultad de conocer con precisión las distribuciones de carga en la mayoría de los casos [1, 2]. Siguiendo el concepto de gradiente aplicado a los campos electromagnéticos, se demuestra que el gradiente negativo del potencial eléctrico corresponde al campo eléctrico. Continuando en este sentido, este planteamiento supone tácitamente conocer la función de potencial eléctrico en toda el área analizada, lo cual no siempre es posible en la práctica. Por otro lado, se dispone de información sobre materiales conductores que pueden adoptar formas diversas, como planos, superficies curvas o líneas, lo que permite establecer condiciones de frontera a partir de su geometría y propiedades físicas [3, 4, 5]. Es en este punto donde la ecuación de Laplace se convierte en una herramienta fundamental para determinar el potencial eléctrico, partiendo de condiciones de frontera conocidas [6, 7]. Para complementar el aprendizaje de este tema, se promueven sinergias metodológicas entre el enfoque STEAM y la ludoplastia. Este tipo de metodologías estimula el pensamiento interdisciplinario y favorece la dinamización del proceso educativo, permitiendo que los estudiantes aborden la problematización desde múltiples perspectivas. De este modo, se implican activamente en la construcción de soluciones y en el diseño de sus propias estrategias de resolución [8, 9, 10]. Por ejemplo, a través del problema del

potencial eléctrico en una caja cuadrada finita propuesto en este trabajo, se realiza el modelado físico del sistema y se generan representaciones gráficas del potencial eléctrico, lo que permite visualizar y analizar su distribución en condiciones específicas [11, 12, 13, 14, 15].

II. ARGUMENTO MATEMÁTICO

A partir de las ecuaciones de Maxwell, donde: $\nabla \cdot \boldsymbol{D} = \rho$, sustituyendo en $\epsilon \boldsymbol{E} = \boldsymbol{D}$ y $-\nabla \cdot V = \boldsymbol{E}$.

$$\boldsymbol{\nabla} \cdot \in (-\nabla V) = \rho, \tag{1}$$

Si en toda la región bajo estudio el medio es homogéneo, entonces ϵ puede retirarse de las derivadas parciales involucradas en la divergencia, obteniéndose la ecuación de Poisson.

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon}. \tag{2}$$

Cuando la región bajo estudio contiene cargas en una distribución de densidad de cargas conocida ρ, la ecuación de Poisson puede usarse para determinar el potencial eléctrico V. Pero si la región de interés está libre de cargas eléctricas con una permitividad uniforme, la ecuación de Poisson se convierte en la ecuación de Laplace.

$$\boldsymbol{\nabla} \cdot \nabla \mathrm{V} = \nabla^2 V = 0. \tag{3}$$

La ecuación de Laplace representa la divergencia del gradiente de V; estas dos operaciones pueden usarse para obtener la forma de la ecuación en un sistema coordenado particular. Para coordenadas cartesianas, el gradiente para el potencial eléctrico está expresado como:

$$\nabla V = \frac{\partial V}{\partial x}\boldsymbol{i} + \frac{\partial V}{\partial y}\boldsymbol{j} + \frac{\partial V}{\partial z}\boldsymbol{k}. \tag{4}$$

Para un campo vectorial general **A**, la divergencia se expresa como:

$$\boldsymbol{\nabla} \cdot \mathrm{A} = \frac{\partial A_x}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}, \tag{5}$$

por consiguiente, la ecuación de Laplace es

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0, \tag{6}$$

Una de las soluciones para la ecuación 6 es mediante el método del producto cartesiano. Cuando el potencial eléctrico varía en más de una dirección, la ecuación 6 contiene más de un término. Suponiendo que V es una función para x como para y, esta tendrá la forma: $V = X(x)Y(y)$. Por separación de variables, la ecuación 6 se transforma en

$$V = [C_1\, cosh(ax) + C_2 senh(ax)][C_3 cos(ay) + C_4 sen(ay)]. \tag{7}$$

Como la ecuación de Laplace es lineal y homogénea, una suma de productos de la forma de la ecuación 7, donde cada producto corresponde a un valor diferente de a, es también una solución. Esta será la solución más general que se puede desarrollar.

III. EL PROBLEMA DEL POTENCIAL ELÉCTRICO PARA UNA REGIÓN CUADRADA FINITA

En esta sección se considera el problema de encontrar la función de potencial eléctrico para la región interna para una caja cuadrada finita, como la que se muestra en la Figura 1.

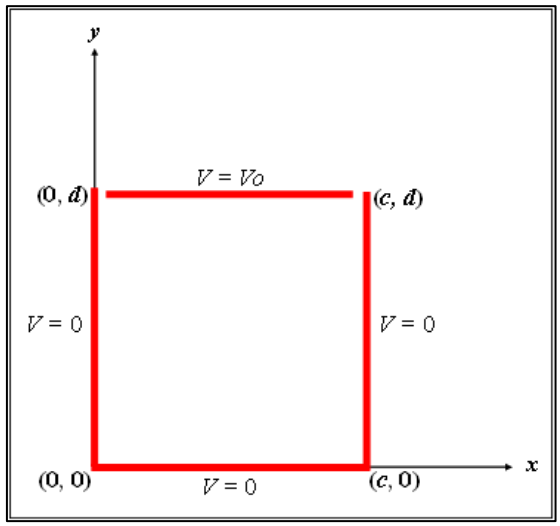


FIGURA 1. Estudio del potencial eléctrico en una caja cuadrada finita.

En el problema bajo estudio, el espacio está libre de carga ($\rho = 0$), y se busca una solución a la ecuación de Laplace ($\nabla^2 V = 0$) que satisfaga las condiciones de frontera. Debido a la importante función que desempeñan las condiciones de frontera, el problema muchas veces se conoce como problema de valor en la frontera. La solución a un problema de valor en la frontera suele facilitarse si se establece en un sistema de coordenadas en el que los límites puedan especificarse de manera sencilla. La frontera, en muchos casos, no puede expresarse simplemente en ningún sistema de coordenadas, y a menudo en tales casos se debe recurrir a otros métodos, como el método de diferencias finitas. Este método resulta ser muy atractivo cuando se asocia con la educación STEAM-Ludoplastia; el aprendizaje por parte de los estudiantes resulta muy creativo y colaborativo. El método de diferencias finitas es una técnica numérica de resolución de ecuaciones como la ecuación de Laplace, el cual se aplicó para dar solución al problema propuesto en este trabajo consistente en encontrar la función del potencial eléctrico para una caja cuadrada finita. El método de

diferencias finitas consistió en dividir la región en secciones M_x, cada una de longitud $\Delta x = (x_f - x_0)/M_x$ a lo largo del eje *x*, y en secciones M_x, cada una de longitud $\Delta y = (y_f - y_0)/M_y$ a lo largo del eje *y*, respectivamente, y luego se reemplaza por las segundas derivadas mediante la aproximación de diferencia central de tres puntos.

$$\left.\frac{\partial^2 V(x,y)}{\partial x^2}\right|_{x_i,y_j} \cong \frac{V_{i,j+1}-2V_{i,j}+V_{i,j-1}}{\Delta x^2} \; con\; x_j = x_0 + j\Delta x, y_i = y_0 + i\Delta y, \tag{8}$$

$$\left.\frac{\partial^2 V(x,y)}{\partial y^2}\right|_{x_i,y_j} \cong \frac{V_{i+1,j}-2V_{i,j}+V_{i-1,j}}{\Delta y^2} \; con\; V_{i,j} = V(x_j, y_i), \tag{9}$$

de modo que, para cada punto interior (x_j, y_i) con $1 \le j \le M_x - 1$ y $1 \le i \le M_y - 1$, obtenemos la ecuación de diferencias finitas.

$$\frac{V_{i,j+1}-2V_{i,j}+V_{i,j-1}}{\Delta x^2} + \frac{V_{i+1,j}-2V_{i,j}+V_{i-1,j}}{\Delta y^2} = 0, \tag{10}$$

donde

$$V_{i,j} = V(x_i, y_j). \tag{11}$$

En este punto es lógico que se pregunte lo siguiente: ¿Cómo se inicializa este algoritmo? Si no se tiene conocimiento previo sobre la solución del problema, es razonable tomar el valor promedio de los valores de frontera como los valores iniciales de $V_{i,j}$. Para ello se desarrolló un algoritmo en MATLAB para utilizar la rutina "*laplace.m*" y dar solución a la ecuación 10.

El objetivo final es la incorporación de la solución mediante un enfoque STEAM-Ludoplastia, el cual se describe como sigue: **STEAM como puente interdisciplinario**. La educación STEAM nos permite tratar el problema desde todos los lados: **Ciencia**: Analizando el fenómeno físico del potencial eléctrico y su vinculación con las leyes fundamentales de la electrostática. **Tecnología**: Utilizando software o modelos numéricos para implementar el método de diferencias finitas, desarrollando habilidades digitales. **Ingeniería**: Creando réplicas del problema propuesto mediante un arreglo de malla con resistencias eléctricas de geometría cuadrada, aplicando conceptos fundamentales y resolviendo problemas complejos a través de herramientas propias de la ingeniería. **Arte**: Los estudiantes pueden representar las curvas del potencial eléctrico con colores y curvas en los que estén incorporadas las magnitudes y distribuciones del potencial eléctrico. **Matemáticas**: Se utilizan aquellos conceptos como la iteración y propiedades de convergencia para obtener soluciones precisas mediante el método de diferencias finitas. **Ludoplastia**: Como herramienta para el aprendizaje activo, aporta un carácter lúdico al proceso educativo, promoviendo una interacción más exigente y significativa. Por ejemplo, los estudiantes construyen una malla de resistencias con geometría cuadrada; utilizando un cautín de 15 W y soldadura de estaño, ensamblan cada componente, finalizando con la conexión de una batería de 8.54 V mediante un conector tipo PP3. El multímetro digital se utiliza para registrar el potencial en cada punto de unión entre cuatro resistencias en la malla. Como una actividad lúdica, los estudiantes asumen el rol de puntos de potencial dentro de una malla simulada, permitiendo calcular iterativamente los valores de dichos potenciales eléctricos mediante la aplicación de condiciones de frontera. El entrenamiento colectivo, mediante dinámicas de trabajo en grupo, tiene como objetivo encontrar soluciones y fomentar la colaboración entre los estudiantes. La inclusión de elementos lúdicos facilita la comprensión del método de diferencias finitas, promueve la participación y convierte el aprendizaje en una experiencia enriquecedora y divertida. Esta metodología permite vincular la aplicación del método con situaciones de la vida cotidiana. El proceso general para resolver un problema mediante diferencias finitas sigue siendo el mismo: definir la malla, establecer las condiciones de frontera, aplicar la ecuación de diferencias finitas e iterar hasta obtener resultados estables. En el contexto actual de la educación STEAM-Ludoplastia, el aprendizaje se orienta hacia la comprensión de beneficios prácticos e inventivos. Por ejemplo, los estudiantes pueden relacionar las curvas del potencial eléctrico con fenómenos del mundo real, como el diseño de circuitos eléctricos o la modelación de campos térmicos. El enfoque interdisciplinario promueve una integración más profunda de conceptos científicos, permitiendo mejorar el pensamiento crítico y la creatividad. Gracias al desarrollo del pensamiento crítico y la creatividad, los estudiantes logran resolver el problema del potencial eléctrico en una región definida por una caja cuadrada finita, utilizando la analogía entre la ecuación de Laplace y la ley de corriente de Kirchhoff. Por lo tanto, se determina el potencial eléctrico *V* en un punto *P* dentro de la caja cuadrada finita, conectando inicialmente cuatro resistencias de R = 10 kΩ, como se muestra en la Figura 2.

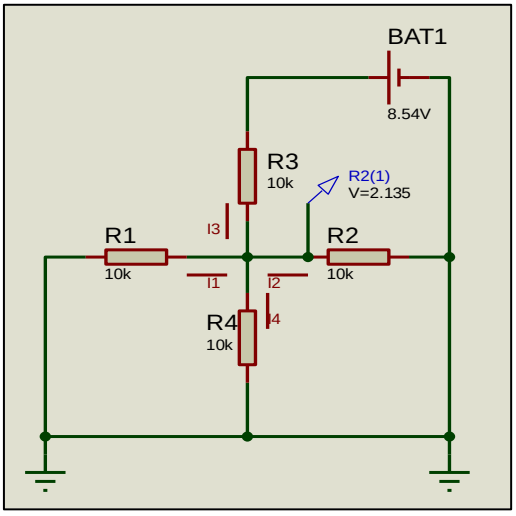


FIGURA 2. Aplicación del análisis de circuitos para la determinación del potencial en el centro de un canal cuadrado finito.

Este arreglo permite simular las condiciones de frontera y aplicar el método de diferencias finitas para obtener una aproximación iterativa del potencial en cada nodo de la malla. Los estudiantes deducen que, según la ley de corrientes de Kirchhoff, en un punto, la suma algebraica de las corrientes en ese punto de unión es cero.

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0, \tag{12}$$

de la ley de Ohm

$$\frac{V_1 - V}{R} + \frac{V_2 - V}{R} + \frac{V_3 - V}{R} + \frac{V_4 - V}{R} = 0, \tag{13}$$

simplificando

$$V = \frac{1}{4}(V_1 + V_2 + V_3 + V_4). \tag{14}$$

El resultado obtenido al aplicar la ecuación de Laplace demuestra que la ley de corrientes de Kirchhoff en un nodo y dicha ecuación son equivalentes bajo condiciones estacionarias. Esto se evidencia al expresar la conservación de la corriente como:

$$\boldsymbol{\nabla} \cdot \mathbf{J} = 0, \tag{15}$$

dado que $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ y $\mathbf{E} = -\boldsymbol{\nabla} V$, se obtiene:

$$\boldsymbol{\nabla} \cdot \mathbf{J} = \sigma \boldsymbol{\nabla} \cdot \mathbf{E} = \sigma \nabla^2 V = 0. \tag{16}$$

Lo anterior conduce directamente a la ecuación de Laplace. Cuando se construye una malla con múltiples resistores y nodos de conexión, es posible determinar con mayor precisión la distribución del potencial eléctrico, como se ilustra en la Figura 3(a). El arreglo experimental para este propósito, utilizando un voltímetro digital, se muestra en la Figura 3(b). En este montaje, los estudiantes presentan una solución experimental basada en mediciones realizadas sobre cuarenta y nueve puntos distribuidos en una malla de resistencias de 10 kΩ, con especificaciones de ½ vatio y ±5 % de tolerancia. La alimentación se realiza mediante una batería de 8.54 V, y las mediciones se efectúan con un multímetro digital modelo MUL-605 operando en modo voltímetro.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se abordaron tres procedimientos para resolver la ecuación de Laplace en el contexto del problema del potencial eléctrico en una caja cuadrada finita: el método analítico, el computacional y el experimental. Cada enfoque presenta ventajas y limitaciones propias. Al enfrentar un problema específico, es fundamental evaluar las características de cada técnica y seleccionar la más adecuada según los requisitos del caso. Los resultados que se presentan a continuación constituyen una comparación entre los métodos computacional y experimental. A partir del análisis numérico y de las mediciones experimentales [ver Figuras 3(a)-(b)], y tras el cálculo de los errores absolutos y relativos, se obtiene una perspectiva clara del comportamiento de ambos conjuntos de datos en el contexto de la solución del potencial eléctrico dentro de un dominio cuadrado finito.

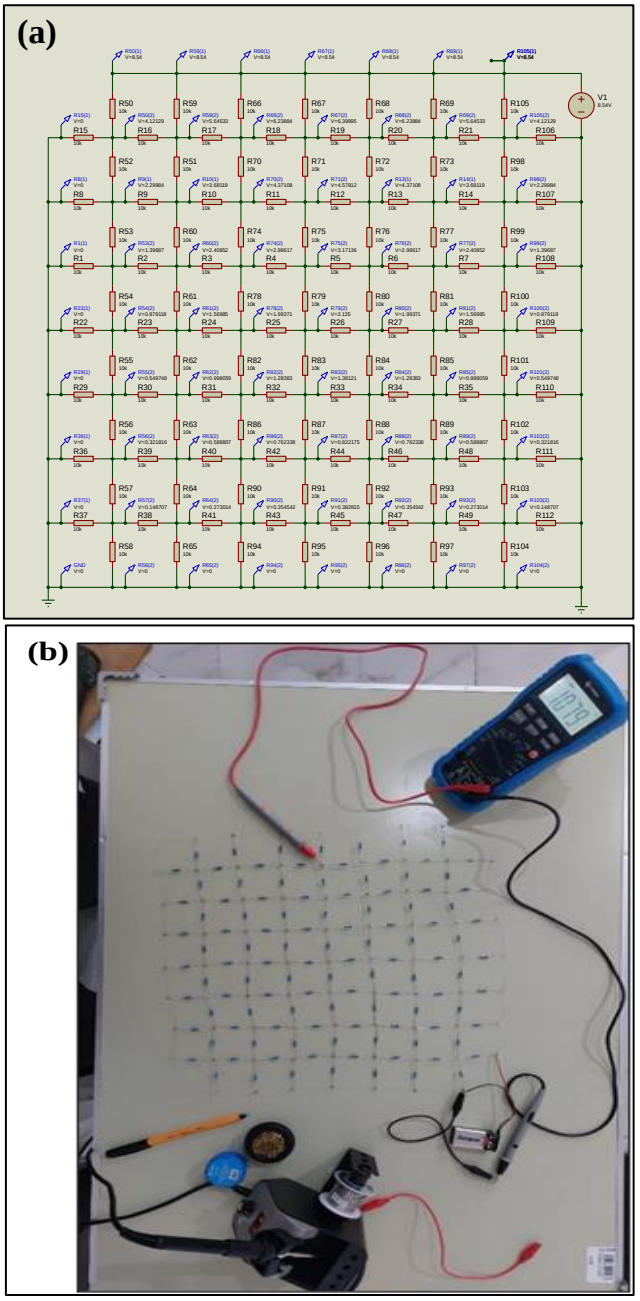


FIGURA 3. Aplicación del análisis de circuitos a la determinación del potencial eléctrico para el problema de la caja cuadrada finita: (a) Medición numérica del potencial en nueve puntos dentro de la región. (b) Medición experimental utilizando una malla de resistencias con geometría cuadrada, donde el potencial se registra mediante un voltímetro digital.

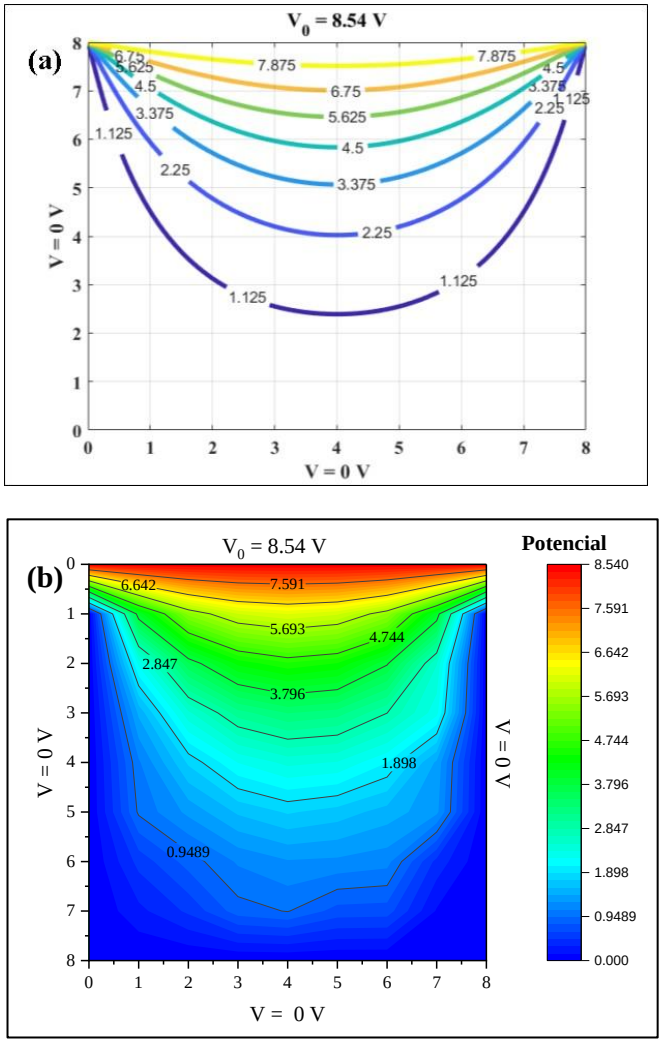


FIGURA 4. Resultados del problema bajo estudio: (a) Resultados obtenidos mediante el método numérico de diferencias finitas. (b) Resultados obtenidos mediante el procedimiento experimental.

Los valores experimentales para el potencial eléctrico abarcan desde 0.9489 V hasta 7.591 V, mientras que los numéricos van de 1.1250 V a 7.8750 V. Esto podría deberse a factores como: Limitaciones en el modelo numérico utilizado. Variabilidad en el entorno experimental que no fue considerada en el modelo e influencia de condiciones de contorno o errores de medición. Los errores más pequeños se encuentran en valores más altos (como el primer y segundo par de datos), mientras que los errores más grandes están en los valores más bajos. Pudo indicar menor precisión del modelo en aquellas zonas en las que los valores disminuyen. Los errores porcentuales son muy altos hacia los valores más bajos, hasta alcanzar el 40.72%. Esto podría ser un signo de que el modelo deja de ser efectivo en ciertos lugares de la resolución del potencial eléctrico. La Tabla I presenta los valores obtenidos mediante los métodos numérico y experimental para el problema del potencial eléctrico en una caja cuadrada finita.

TABLA I. Cálculo detallado de los resultados para cada par de valores.

Datos Numéricos	Datos Experimentales	Error Absoluto	Error Relativo (%)
7.8750	7.591	0.284	3.74%
6.7500	6.642	0.108	1.63%
5.6250	5.693	0.068	1.19%
4.5000	4.744	0.244	5.14%
3.3750	3.796	0.421	11.09%
2.2500	2.847	0.597	20.96%
1.1250	1.898	0.773	40.72%

Las medias (numérica: 4.214, experimental: 4.753, error absoluto: 0.356) y medianas (numérica: 4.5, experimental: 4.744, error absoluto: 0.284) de ambos conjuntos de datos presentan valores cercanos, lo que indica una aproximación numérica razonable al comportamiento observado en la experimentación. Lo anterior sugiere que el modelo numérico reproduce adecuadamente la tendencia global de las mediciones. Además, los datos numéricos exhiben un rango más restringido en comparación con los experimentales, lo que refleja una menor dispersión y mayor estabilidad en el cálculo teórico. Al analizar los resultados presentados en la Tabla I, se observa que los errores absolutos son menores en los valores más altos del potencial eléctrico. Esto indica que las desviaciones entre los datos numéricos y experimentales tienden a ser más pequeñas en las regiones de mayor magnitud, mientras que aumentan progresivamente conforme disminuye el valor del potencial. Los errores relativos tendrían un incremento importante para los valores más pequeños, llegando al 40.72%. La variación se debe a que la precisión del modelo numérico decrece para el caso de los valores experimentales menores. Como análisis final, se les solicitó a los estudiantes que realizaran el cálculo de errores, en este caso para el error absoluto, el cual lo aplicaron restando el valor experimental al valor numérico y tomando el valor absoluto. El error relativo (en porcentaje) lo calcularon con el error absoluto dividido entre el valor experimental y multiplicado por 100 para obtener el porcentaje. La Figura 4 presenta en detalle la comparación entre los datos numéricos y experimentales obtenidos en el estudio. En la Figura 4(a), se muestra una gráfica lineal que superpone ambos conjuntos de datos, permitiendo visualizar su concordancia. La Figura 4(b) representa el error absoluto mediante barras, destacando las diferencias puntuales entre los valores teóricos y experimentales. Finalmente, la Figura 4(c) muestra el error relativo en porcentaje, también mediante una gráfica de barras, lo que facilita la identificación de zonas con mayor sensibilidad o dispersión.

Las figuras de los errores absolutos y relativos conciernen patrones relevantes: Las diferencias visuales son más aparentes en las zonas de bajas magnitudes del potencial. Las líneas de contorno numéricas y experimentales probablemente tengan coincidencias en zonas de alta magnitud, pero podrían divergir en las zonas de baja magnitud. Este análisis proporciona datos útiles que permiten ajustar el modelo numérico, ya sea refinando las

condiciones de contorno o incrementando la resolución computacional, con el objetivo de reducir los errores en las zonas más sensibles del dominio.

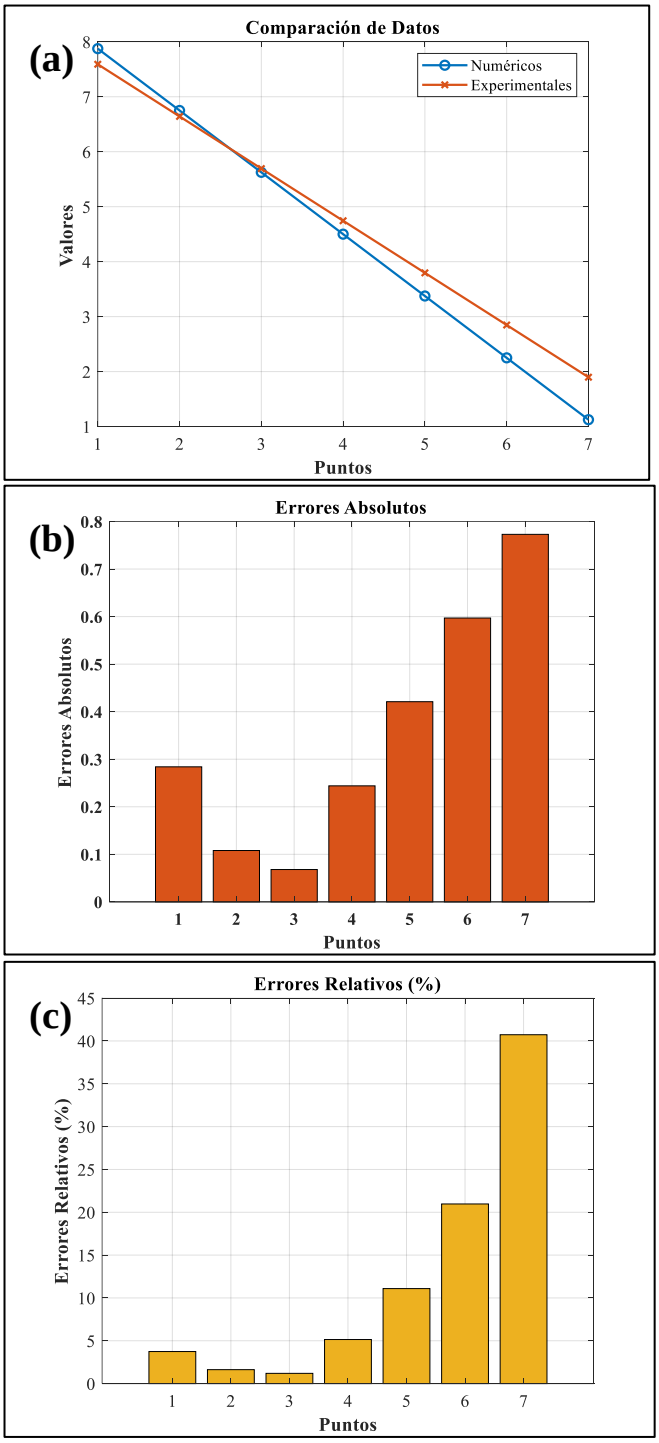


FIGURA 4. Comparación de los datos obtenidos: (a) Conjunto de datos numéricos y experimentales para el potencial eléctrico. (b) Cálculo del error absoluto entre ambos métodos. (c) Determinación del error relativo expresado en porcentaje.

Es recomendable considerar la estimación de parámetros adicionales dentro del modelo numérico, con el propósito de reflejar con mayor fidelidad las condiciones observadas en el entorno experimental. Esta incorporación puede contribuir a mejorar la concordancia entre simulación y medición, especialmente en regiones donde se detecta mayor sensibilidad o dispersión en los datos. Desde el punto de vista experimental, resulta pertinente investigar la variabilidad introducida por factores como el ruido eléctrico, la temperatura ambiente o configuraciones específicas del montaje que puedan influir en la recopilación de datos.

El análisis estadístico, particularmente el trazado de la desviación estándar (numérico: 2.291, experimental: 1.899 y error absoluto: 0.248) y el rango (numérico: 6.7500, experimental: 5.693, error absoluto: 0.705), ha permitido destacar diferencias estructurales entre los conjuntos numéricos y experimentales, evidenciando zonas de mayor sensibilidad y dispersión en el modelo experimental. El análisis estadístico no solo ha permitido cuantificar los errores, sino también identificar con mayor precisión las áreas específicas en las que la solución numérica puede ser optimizada. Esta capacidad de localización de zonas sensibles resulta fundamental para orientar ajustes en el modelo y mejorar la concordancia con los datos experimentales. A partir del mismo análisis, es posible dar continuidad a nuevas simulaciones utilizando ajustes en el modelo numérico, las cuales podrían reiterarse en estudios comparativos para mejorar aún más la precisión de los resultados. Por otro lado, en el enfoque experimental, resulta necesario investigar la influencia de factores externos que puedan estar afectando las mediciones, tales como interferencias ambientales, variaciones en la calidad de los componentes o condiciones no controladas durante la adquisición de datos.

La rutina diseñada en MATLAB destinada a la visualización pormenorizada de los resultados, debe generar líneas de contorno detalladas que permitan observar directamente cómo se comportan las soluciones en la región bajo estudio. Esta representación gráfica facilitará la interpretación del potencial eléctrico en cada nodo de la malla y reforzará la comprensión del método de diferencias finitas.

Finalmente, los resultados para los errores absolutos demuestran un aumento significativo para los últimos datos numéricos experimentales, indicando mayor discrepancia hacia los valores bajos. Los errores relativos también muestran un incremento considerable, especialmente en el par de datos mínimos en los extremos del modelo experimental para el potencial eléctrico, como 1.898 V y 0.9489 V.

V. CONCLUSIONES

Los resultados experimentales y numéricos permiten obtener una solución para el potencial eléctrico en una región cuadrada finita, en el marco del problema planteado. Esta solución refleja los errores calculados por el algoritmo en

MATLAB, lo que permite evaluar la precisión del modelo y su capacidad de aproximación frente a las condiciones reales. Se aprecia una notable similitud en los resultados correspondientes a los bordes centrales, especialmente en las medias y medianas de ambos conjuntos de datos, que presentan valores cercanos. Esta concordancia estadística sugiere que el modelo numérico ofrece una aproximación adecuada al comportamiento promedio observado experimentalmente, reproduciendo con corrección la tendencia global de los valores medidos en la región analizada. Además de presentar ciertas discrepancias en las escalas utilizadas, particularmente en la escala numérica, los datos computacionales exhiben una resolución más fina que la obtenida experimentalmente. Esta capacidad de resolución más fina en el modelo numérico permite identificar gradientes de potencial eléctrico que, por limitaciones instrumentales o condiciones experimentales, no se manifiestan con la misma claridad en las mediciones físicas. Por ello, al comparar ambos enfoques, es fundamental considerar no solo los valores obtenidos, sino también la escala y sensibilidad con la que fueron registrados, ya que estas diferencias pueden condicionar la interpretación y validación del modelo. La variedad de datos obtenidos, tanto de carácter experimental como numérico, presenta discrepancias en los valores pequeños del potencial eléctrico, mientras que los valores altos muestran una coincidencia casi exacta entre ambos conjuntos. Esta divergencia en los promedios pequeños puede atribuirse a factores adicionales involucrados en la ejecución del análisis, tales como la sensibilidad instrumental, las condiciones de contorno o la resolución espacial del modelo. La comparación lineal, junto con las gráficas de barras del error absoluto y relativo, complementa la interpretación del análisis y permite identificar con claridad las zonas del dominio donde el modelo presenta mayor o menor precisión. Esta visualización conjunta facilita la evaluación espacial del desempeño numérico frente a los datos experimentales. Finalmente, en función de los resultados obtenidos, algunas sugerencias para un mejor análisis pueden ser: mayor refinamiento en el modelo numérico mediante una menor discretización para tener mayor precisión en las áreas donde el paso es más alto; definición de factores experimentales en la simulación. El método aplicado demuestra que el modelo numérico se ajusta en función de los datos proporcionados experimentalmente, presentando algunas diferencias que pueden ser corregidas mediante un enfoque experimental de mayor rigor. Esta retroalimentación entre simulación y medición permite afinar el comportamiento del modelo y mejorar su capacidad de representación física.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad de Guanajuato y a las autoridades de la Escuela de Nivel Medio Superior Centro Histórico León y de Guanajuato, por todo el apoyo recibido en el desarrollo de este trabajo educativo.

REFERENCIAS

[1] Cilleruelo, L. & Zubiaga, A., *Una aproximación a la Educación STEAM. Prácticas educativas en la encrucijada arte, ciencia y tecnología*, Jornadas de Psicodidáctica **18**, 1-18 (2014).

[2] de la Portilla, J. G. P., May, C. H. L., Chí, M. R. C., Vela, J. A. M. & Pacheco, M. J. K., *Implementación de prototipos didácticos de robótica como estrategia de enseñanza en la educación básica: Implementation of robotic didactic prototypes as a teaching strategy in basic Education*, LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades **5**, 913-922 (2024).

[3] Greca Dufranc, I. M., Ortiz Revilla, J. & Arriassecq, I., *Diseño y evaluación de una secuencia de enseñanza-aprendizaje STEAM para Educación Primaria*, Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias **18**, 1-20 (2021).

[4] Zeidler, D. L., *STEM education: A deficit framework for the twenty first century? A sociocultural socioscientific response*, Cultural Studies of Science Education **11**, 11-26 (2016).

[5] Robinson, K., *Out of Our Minds: Learning to be Creative* by Robinson, (Ken, USA, 2011).

[6] Colucci-Gray, L., Burnard, P., Gray, D. & Cooke, C., *A critical review of STEAM* (*science, technology, engineering, arts, and mathematics*), (Oxford research encyclopedia of Education, UK, 2019).

[7] Ortiz-Revilla, J., Adúriz-Bravo, A. & Greca, I. M., *A framework for epistemological discussion on integrated STEM education*, Science & Education **29**, 857-880 (2020).

[8] Colucci-Gray, L., Burnard, P., Gray, D. & Cooke, C., *A critical review of STEAM* (*science, technology, engineering, arts, and mathematics*), (Oxford research encyclopedia of Education, UK, 2019).

[9] Canfarotta, D. & Pipitone, M., *An International case study: The metaverse in the classical high school*. Pedagogical Perspective, 41-58 (2024).

[10] Santillán-Aguirre, P., Jaramillo-Moyano, E., Hernández-Andrade, L. & Santos-Poveda, R., *ABP and STEAM as Active Learning Methodologies El*. ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of STEAM, 764-779 (2023).

[11] Castro, A., Díaz, B., Aguilera, C., Prat, M. & Chávez-Herting, D., *Identifying Rural Elementary Teachers' Perception Challenges and Opportunities in Integrating Artificial Intelligence in Teaching Practices*. Sustainability **17**, 2748 (2025).

[12] Solier, P. M. S. & Soto, V. V., *Educación artística STEAM en la formación universitaria. Robótica creativa para la alfabetización visual y digital*, European Public & Social Innovation Review **9**, 1-20 (2024).

[13] Flores-Velásquez, C. H., Olivares-Zegarra, S., Dávila-Ignacio, C., Arévalo-Tuesta, J. A., Morales-Romero, G., Trinidad-Loli, N., Caycho-Salas, B., Aybar-Bellido, I., Arones, M. & Aldana-Trejo, F., *A bibliometric review of studies about the acceptance of artificial intelligence technologies in teaching and learning in higher education*,

International Journal of Learning, Teaching and Educational Research **23**, 275-292 (2024).
[14] Cáceres, Á. E. A., *Fortalecimiento y Perfeccionamiento de Habilidades Técnicas en Electricidad Básica para Estudiantes de Primero de Bachillerato*, Multidisciplinary Journal of Sciences, Discoveries, and Society **2**, 1-14 (2025).
[15] Ortiz-Revilla, J., Greca, I. M. & Meneses-Villagrá, J. Á., *Effects of an integrated STEAM approach on the development of competence in primary education students* (*Efectos de una propuesta STEAM integrada en el desarrollo competencial del alumnado de Educación Primaria*), Journal for the Study of Education and Development **44**, 838-870 (2021).

Optics Learning Beyond the Classroom: Non-Formal STEM Strategies for Rural Students

ISSN 1870-9095

Emma Vianey García Ramírez[1,2], Patricia Mendoza-Mendez[1], Carmen del Pilar Suárez Rodríguez[3]

[1]*Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.*

[2]*Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación, Ciudad de México, México.*

[3]*Coordinación Académica Región Huasteca Sur, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tamazunchale, San Luis Potosí, México.*

E-mail: pilar.suarez@uaslp.m**x**

(Recibido el 6 junio de 2025, aceptado el 3 de septiembre de 2025)

Abstract

Evidence on non-formal optics education in rural contexts remains scarce (<10%), revealing an equity gap in access to meaningful STEM learning. We conducted a PRISMA-guided systematic review of 38 empirical studies with school-age learners (5–18). Four research questions examined: (PI1) effects on conceptual understanding compared with formal instruction or pre–post baselines; (PI2) the added value of news articles and interactive visualizations for transfer, curiosity/motivation, and self-efficacy; (PI3) pedagogical features linked to higher learning gains; and (PI4) contextual differences across rural vs. urban and Latin America vs. other regions. Searches in Scopus, Web of Science (Core Collection), and ERIC (1990–2025), with Elicit as supplementary discovery, included experimental, quasi-experimental, and pre–post designs reporting validated optics outcomes (reflection, refraction, image formation, wave optics). Studies were conducted primarily in non-formal settings, museums, university labs, after-school programs, camps, and in school-based outreach/museum-integrated activities. Results show consistent gains in conceptual understanding; larger effects occur when perceived authenticity, guided inquiry, and sustained hands-on activity converge, supported by low-cost materials and simulations. A small subset indicates that news-based and interactive visual resources enhance transfer, curiosity/motivation, and self-efficacy. We conclude with a STEM-informed, culturally responsive workshop model for rural learners and propose a research agenda emphasizing rural implementations, delayed retention measures, standardized instruments, and sociocultural moderators to translate non-formal optics learning into durable, context-relevant outcomes.

Keywords: Optics Education, Non-Formal Learning, Conceptual Understanding, STEM.

Resumen

La evidencia sobre la educación óptica no formal en contextos rurales sigue siendo escasa (<10%), lo que revela una brecha de equidad en el acceso a un aprendizaje significativo en STEM. Realizamos una revisión sistemática guiada por PRISMA de 38 estudios empíricos con estudiantes en edad escolar (5-18 años). Cuatro preguntas de investigación examinaron: (PI1) efectos en la comprensión conceptual en comparación con la instrucción formal o líneas base pre-post; (PI2) el valor añadido de los artículos periodísticos y las visualizaciones interactivas para la transferencia, la curiosidad/motivación y la autoeficacia; (PI3) características pedagógicas vinculadas a mayores logros de aprendizaje; y (PI4) diferencias contextuales entre zonas rurales y urbanas, y entre América Latina y otras regiones. Las búsquedas en Scopus, Web of Science (Colección Principal) y ERIC (1990-2025), con Elicit como descubrimiento complementario, incluyeron diseños experimentales, cuasiexperimentales y pre-post que reportaron resultados ópticos validados (reflexión, refracción, formación de imágenes, óptica ondulatoria). Los estudios se realizaron principalmente en entornos no formales, museos, laboratorios universitarios, programas extraescolares, campamentos y actividades de divulgación escolar integradas en museos. Los resultados muestran mejoras consistentes en la comprensión conceptual; los efectos más significativos se producen cuando convergen la autenticidad percibida, la indagación guiada y la actividad práctica sostenida, con el apoyo de materiales y simulaciones de bajo costo. Un pequeño subconjunto indica que los recursos visuales interactivos y basados en noticias mejoran la transferencia, la curiosidad/motivación y la autoeficacia. Concluimos con un modelo de taller basado en STEM y culturalmente receptivo para estudiantes rurales y proponemos una agenda de investigación que enfatiza las implementaciones rurales, las medidas de retención diferida, los instrumentos estandarizados y los moderadores socioculturales para traducir el aprendizaje no formal de óptica en resultados duraderos y relevantes para el contexto.

Palabras clave: Educación en Óptica, Aprendizaje No Formal, Comprensión Conceptual, STEM.

I. INTRODUCTION

Non-formal learning environments-such as university laboratories, summer camps, school-based outreach programs, and extracurricular courses-provide students with hands-on experimentation and authentic tasks when studying optical principles [1]. These settings have been recognized as essential to fostering meaningful learning experiences, as they immerse participants in concrete, active engagement that promotes deeper and longer-lasting conceptual understanding.

Beyond content acquisition, non-formal environments nurture critical competencies such as creative thinking, problem-solving, communication, collaboration, and autonomy, which are vital for both personal development and professional success. One of the key advantages of these contexts is their flexibility, they allow for the adaptation of content, pace, and learning location according to individual needs and interests, thus enhancing learner agency and motivation.

Authentic learning situations offer students opportunities to apply scientific knowledge in real-life contexts. Unlike traditional classroom methods that often rely on abstraction [2, 3], experiential and situated learning can significantly boost both motivation and the development of domain-specific skills [4, 5]. However, the effectiveness of these learning experiences depends heavily on the students' perceived authenticity [6, 7]. If students do not perceive the learning situation as realistic or relevant, the intended cognitive and affective outcomes may not be achieved. Therefore, educators must consider students' subjective perceptions when designing non-formal learning interventions to optimize their educational impact.

In the context of optics education, non-formal environments complement traditional instruction by providing intimate, experiential, and situated learning opportunities. These spaces can enrich students' understanding of complex physical phenomena such as light, reflection, and refraction through observation, manipulation, and inquiry.

This paper presents a PRISMA-guided systematic literature review addressing four research questions (PI1–PI4) on non-formal optics education for school-age learners (5–18), focusing on effects on conceptual understanding, the added value of news articles and interactive visualizations, pedagogical features associated with larger gains, and contextual differences (rural vs. urban; Latin America vs. other regions).

The findings of this systematic review will serve as the empirical foundation for designing a context-responsive science workshop tailored to rural learners. By identifying the most effective pedagogical strategies in non-formal settings-such as authenticity, hands-on inquiry, and contextual relevance-we aim to develop a learning experience that not only addresses students' alternative conceptions of light but also fosters equitable access to scientific knowledge. The review guides both the structure and content of the intervention, ensuring that each activity is grounded in evidence-based practices and aligned with the cognitive and sociocultural characteristics of the target population. Ultimately, this review is not an end, but rather a starting point for a pedagogical design process that aspires to bridge research, outreach, and inclusive science education.

Non-formal educational environments promote the assimilation and appropriation of optical concepts through practical experimentation and problem-solving. Additionally, they provide flexibility and customization in learning, enabling students to progress at their own pace and according to their cognitive abilities. Activities in non-formal settings mirror real-life scientific practices, thereby reinforcing motivation and facilitating the transfer of knowledge in authentic and meaningful contexts. These environments also foster the Zone of Proximal Development through collaboration and guidance from trained educators, emphasizing learning as a social process mediated by interaction with others and with cultural tools. Moreover, engaging with real-life optical phenomena (such as reflection and refraction) in non-formal settings allows students to follow the experiential learning cycle: concrete experience - reflective observation -abstract conceptualization - active application.

Taken together, these elements place the teaching of optics within a constructivist framework-cognitive and experiential in nature-with a social dimension grounded in situated learning.

Considering these considerations, it becomes necessary to explore the theoretical foundations that support learning in non-formal environments, especially those grounded in constructivist, sociocultural, and STEM-based approaches, which offer valuable guidance for designing effective and context-sensitive educational interventions.

II. THEORETICAL FOUNDATION

Grounded in the constructivist and sociocultural perspectives previously discussed, the present study conducted a systematic literature review to examine how non-formal educational interventions support conceptual learning in optics among school-age learners.

Active learning is grounded in educational theories that emphasize the sociocultural and constructivist nature of science learning. Vygotsky's concept of the Zone of Proximal Development (ZPD) [8] highlights that learning is most effective when students engage in guided exploration alongside peers or facilitators. This perspective is particularly relevant in non-formal settings, where dialogic interaction, voluntary participation, and context-sensitive pedagogy foster meaningful learning processes. By situating learners within authentic experiences, these environments encourage the development of conceptual understanding through social mediation, experimentation, and reflection.

Similarly, the theory of situated learning [9], highlights the importance of authentic practices and the context in which learning occurs. In non-formal education, tasks are embedded in real-life situations, allowing students to construct meaning through experience and social participation. This experiential foundation is essential when teaching optics, a domain often perceived as abstract and disconnected from everyday life.

Non-formal education, as conceptualized by Malcolm, Hodkinson and Colley, in reference [10], is not merely a matter of setting, but of pedagogy: it promotes learning that is voluntary, learner-centered, and context-responsive. It allows for the integration of culturally relevant knowledge and flexible pacing, which is critical when working with underserved populations or in rural contexts where access to formal resources is limited.

Moreover, the constructivist paradigm, particularly in science education, advocates for inquiry-based learning, hands-on exploration, and reflection as pillars of meaningful understanding. When students manipulate materials, test ideas, and reflect in community, they are more likely to develop both conceptual understanding and a sense of ownership over scientific knowledge.

Taken together, these theoretical perspectives provide a strong foundation for understanding the value and potential of non-formal optics education, particularly when applied in rural or marginalized contexts where science education must be as inclusive as it is rigorous.

Additionally, the STEM framework (Science, Technology, Engineering, and Mathematics) reinforces constructivist and sociocultural theories by promoting interdisciplinary, problem-centered learning. It encourages students to engage in modeling, prototyping, and testing-practices that not only align with engineering design but also deepen scientific understanding. The integration of STEM into non-formal education is particularly powerful in rural contexts, where learners can investigate locally meaningful phenomena while developing scientific and technological competencies. STEM education strengthens these perspectives by introducing timely, relevant, and accessible materials that foster cognitive and emotional connections to scientific content [11].

Within this teaching approach, the inclusion of learning activities that promote cognitive, procedural and socio-emotional skills become relevant. It has been seen that, for example, integrating information resources such as news and interactive visualizations into science teaching can strengthen students' motivation, curiosity, and knowledge retention [12]. When these resources are adapted to rural or historically underserved contexts, they not only act as bridges between scientific literacy and everyday media, but as Loaiza suggests, they become tools for transforming realities, recognizing in rural territories a fertile space for generating science with cultural relevance, social commitment, and community roots [13, 14].

In reference [15] Martínez and Suárez explored conceptions of light in 10- to 12-year-old children participating in a regional science competition. Through an analysis of their responses, they found that 50% of the children are conceived of light as an entity that moves through space, an idea closer to the scientific view than the traditional conception of light as a source or effect. This research highlights the importance of outreach and informal teaching contexts for identifying and promoting advanced scientific concepts from an early age, even in the absence of systematic instruction. In this case, the competition itself, although structured as an exam, is configured as a scientific outreach activity, by generating a non-school-based space where reflection, contact with physical phenomena, and the exploration of individual explanations are activated. The authors conclude that these experiences contribute to expanding students' empirical range and facilitate more evolved mental frameworks, suggesting that it is possible to improve learning about scientific concepts of light in children through well-designed interventions in informal settings [15].

Sociocultural theories, the constructivist approach, non-formal education pedagogy, and the STEM perspective converge on a common idea: scientific learning can be profound, meaningful, and transformative when it connects with students' realities, is supported by authentic practices, and is promoted in flexible, voluntary, and culturally relevant spaces. This framework enables the design of an optics workshop in rural communities that not only teaches concepts but also empowers children scientifically as epistemic actors within their own territory.

In informal settings, with an emphasis on active approaches and in school populations between 5 and 18 years old. This review allowed us to identify both the most effective pedagogical approaches-such as guided inquiry, contextualization, and situated learning-and the main limitations of existing research, including the limited presence of studies in rural settings, the weak articulation between diagnosis and intervention, and the lack of cultural adaptation in the resources used. The review not only provides a solid empirical basis to support the design of an optics learning activity in informal settings for rural communities but also guides the construction of a pedagogical intervention aligned with principles of equity, contextual relevance, and scientific rigor.

III. METHODOLOGY

This study aims to identify the progress and gaps in educational interventions developed in non-formal settings for optics learning among children and adolescents. It also analyzes the characteristics of their implementation, the most effective strategies, and the pedagogical approaches employed to guide future situated, inclusive, and evidence-based teaching proposals, especially in rural contexts.

The objectives set out in the following review are as follows:

O1. To identify and analyze empirical studies related to the teaching of optics in non-formal environments and their impact on the conceptual understanding of students aged 5 to 18.

O2. To examine the characteristics of educational interventions implemented in these settings to determine which pedagogical strategies are the most effective.

O3. To propose an empirical basis for the design of a science pedagogical intervention, grounded in STEM principles, aimed at rural communities, and aligned with the effective educational practices identified in the review.

TABLE I. Inclusion and exclusion criteria of the review.

Inclusion criteria	Exclusion criteria
Examines learning in non-formal educational settings (outdoor learning environments, after-school programs)	Examinations learning in formal educational settings
Measures specific learning outcomes related to conceptual understanding, skill development, or knowledge retention	Does not measure specific learning outcomes related to conceptual understanding, skill development, or knowledge retention
Examine and describe specific pedagogical approaches or teaching methods	Does not examine or describe specific pedagogical approaches or teaching methods
Employ qualitative, quantitative, or mixed methods approaches and provide empirical evidence	Does not employ qualitative, quantitative, or mixed methods approaches, nor provide empirical evidence
It focuses specifically on education in optics (including geometric optics, physical optics, or applied optics) rather than general science education	It focuses specifically on general science education
Presence of a comparison group exposed to formal classroom instruction	Absence of comparison group exposed
Was written in English or Spanish	Was written in other language
Participant age between 5 and 18 years old	Age of participants outside the range of 5 to 18 years
It was published between 1990 and 2025	It was published outside the time range of 1990 to 2025
Presence of a comparator: Formal classroom instruction or a pre-post baseline within the same sample.	No outcome comparison (e.g., single-group cross-sectional without pre/post) or insufficient data to estimate change.

To achieve this objective, this work poses four research questions:

P1. How do non-formal learning settings impact students' understanding of optical principles compared to traditional classroom instruction?

P2. What specific cognitive and learning outcomes are influenced when news-based resources are integrated into non-formal STEM learning settings to teach optical principles

P3. What are the key pedagogical features in non-formal settings that contribute to deep learning in optics?

P4. How do contextual differences (rural vs. urban, and Latin America vs. other regions) moderate learning outcomes and design features in non-formal optics education?

To obtain an optimal and ethical search, which is traceable and whose validity can be guaranteed, it has been carried out considering the criteria of the PRISMA declaration [16, 17]. The documents analyzed correspond to the search in the databases: Scopus, Web of Science (WoS), ERIC and Elicit, an AI-powered research assistant designed to facilitate literature reviews. The search strings associated with each database and the Elicit prompt used for supplementary discovery are shown in Figure 1.

A. Search strategy

We searched Scopus, Web of Science (Core Collection), and ERIC (1990 – 2025). Base strings combined optics terms (optics, reflection, refraction, image formation) with non-formal settings (non-formal/informal, museums, camps, outreach/after-school) and school-age terms (students 5–18). Optional add-ons retrieved subsets on media/interactive visualizations (PI2) and rural/Latin America (PI4). Filters included peer-reviewed articles/proceedings in English/Spanish. Additionally, Elicit was used as a supplementary discovery tool to identify records potentially missed by the primary databases. Full Boolean strings appear below; PRISAM counts are reported in the next subsection.

Scopus: (optics OR optical) AND (education OR learning OR teaching) AND (non-formal OR informal OR out-of-school OR extracurricular)

Web of Science (Core): (optics OR optical) AND (education OR learning OR teaching) AND (non formal OR informal OR out-of-school OR extracurricular)

ERIC: (optics OR optical) AND (education OR learning OR teaching) AND (non-formal OR informal OR out-of-school OR extracurricular)

B. Eligibility

Records were eligible if they: (i) involved learners aged 5–18; (ii) targeted optics content; (iii) took place in a non-formal setting (eg., museums, university labs, after-school/outreach, camps); (iv) included a comparator, either formal instruction or a pre–post baseline within the same group; and (v) reported validated outcomes for conceptual understanding (secondary outcomes: transfer, motivation, self-efficacy).

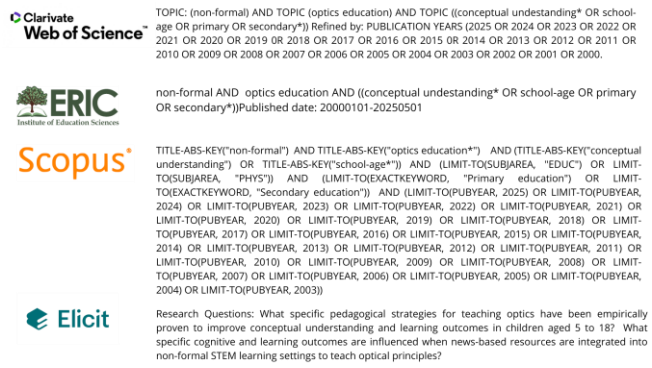


FIGURE 1. Search expressions used in the consulted databases.

C. Study selection and PRISMA flow

Following PRISMA, 723 records were identified across sources. After de-duplication, 321 unique records were screened at title level, excluding 170. 151 abstracts were assessed; 70 full texts were retrieved and evaluated. 32 full texts were excluded with reasons, yielding 38 studies included in the qualitative synthesis (no meta-analysis). PRISMA counts are shown in Table II and Figure 2.

TABLE II. PRISMA counts.

Step	Symbol	Count	Notes
Records identified Web of Science (Core)	N_1	95	1990–2025; EN/ES; Article/Proceedings; SCI-EXP/SSCI/ESCI
Records identified Scopus	N_2	40	1990–2025; EN/ES; Article/Conference Paper
Records identified ERIC	N_3	443	Peer reviewed; Elementary/Secondary; 1990–2025; EN/ES
Other sources (Elicit, snowballing)	N_4	145	Only peer-reviewed; and eligible records
After de-duplication	N_5	321	Duplicates removed = 723 − 321 = 402
Title screening excluded	N_6_excl	170	Screened at title level from N_5
Abstracts assessed	N_7_abs	151	-
Full texts assessed	N_7_full	70	-
Full texts not retrieved	N_7nr	0	0
Full text excluded (with reasons)	N_8_excl	32	See Figure 2 for reason codes.
Included in qualitative synthesis	N_incl	38	No quantitative meta-analysis was conducted

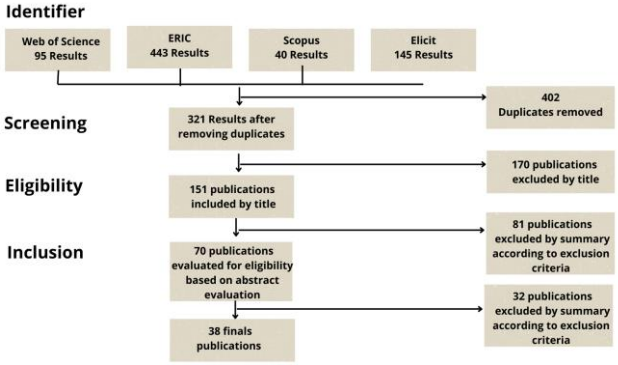


FIGURE 2. Diagram of the publication selection procedure, based on the PRISMA Declaration model (Moher et al., 2009).

Study selection summary. Inclusion/exclusion criteria (Table 1) were applied at each stage of screening. PRISMA counts are summarized in Table II and visualized in Figure 2. The review then proceeded to data extraction (design, context, intervention, measures, outcomes) to support the impact synthesis. A comparative overview of the included studies appears in Table III, with the subset addressing PI2 detailed in Table IV.

TABLE III. Comparative Overview of 26 Studies on Non-Formal Optics Education: Contexts, Strategies, and Outcomes.

Paper	Study Setting Type	Sample Size	Grade Level	Learning Environment Description
Hohrath et al., 2024 [1]	Out-of-school university lab	142	7th/8th grade	Real laboratory at a university; students investigated sun thalers using various light sources and apertures in guided or self-determined groups
Rathi et al., 2024 [18]	School-based outreach (22 schools)	1200	10th grade	Practical demonstrations and hands-on workshops using a Ray Optics Kit in classrooms
Raju et al., 2014 [19]	School-based workshop	NR	Upper primary	Workshops in upper primary schools near college; group activities on optics concepts
Semenova, 2005 [20]	Extra-curricular course	NR	Primary	Additional course for primary children; simple experiments and demonstrations
Isma and Nurlaela, 2024 [21]	Formal classroom (quasi-experimental) †	48	11th grade	Cognitive apprenticeship model in regular classes; focus on optical instruments
Udupa and Goddard, 2022 [22]	Summer camps and schools (mixed)	NR	9th grade	Table-top experiment introducing optical imaging principles using off-the-shelf parts
Efendi and Prima, 2020 [23]	Formal classroom† (private secondary schools)	26	8th grade	Project-based learning; students made homemade projectors
Johnson et al., 2007 [24]	Informal science education program	NR	Middle School	Hands-On Optics (HOO) program; national outreach to underrepresented students
Masi, 1995 [25]	Out-of-school lab/summer program	NR	Junior High	Summer and extension classes; college students taught junior high students' optics via hands-on experiments
Catena, 2024 [26]	High school formal classroom†	60	Secondary school	The students participated in a Teaching Intervention Module (TIM)

				on optical spectroscopy,
Kurniawati, 2018 [27]	Four senior high schools	128	High	Students took exams and interviews on optics concepts, particularly refraction, image formation, and laws of reflection,
Planinić, 2024 [28]	Formal educational environment†	Control grupo: 140 Experimental group:138	Secondary School	Lecture-based in control group, whereas in the experimental group, an inquiry-based teaching sequence was used, involving guided experiments and exploration activities related to wave optics.
Costa, 1997 [29]	classrooms during regular class time and in after-school voluntary sessions, in rural and urban environments	400	preschool or elementary levels	The emphasis was on active, hands-on experimentation, encouraging students to observe, discuss, analyze critically, and explore physics concepts
Leonard, 2012 [30]	Formal classrooms†, rural and urban environments	166	Middle school students	teachers adapted the curriculum to meet educational standards, and students actively engaged in hands-on activities related to optics and astronomy
Gero, 2014 [31]	Formal Classroom† (private high school)	14	Junior High School	It includes theoretical lessons, laboratories, project work, and a final team project where students design and implement an electro-optical system
Leonard, 2013 [32]	Formal classroom†	186	7th/8th grade	Students engaged in hands-on and theoretical activities
Juárez, 2015 [33]	Formal classrooom†	NR	Secondary school	Specific didactic proposal to teach optical phenomena, experimental activities
Sparks, 2010 [34]	Formal educational environment†	NR	High school	The classroom involved weekly written feedback from students on the activities, fostering an interactive and inclusive learning atmosphere.
Galili, 2000 [35]	Formal classroom†	NR	High school	Physics classes wherein students' prior knowledge was assessed through written responses and drawings.
Ndihokubwayo, 2020 [36]	Formal classroom† Urban	153	Secondary school	Physics laboratories, digital resources such as PhET simulations and YouTube videos.
Dokter, 2010 [37]	Formal Classroom†	NR	Primary And Secondary school	Classrooms and laboratories where diagnostic questions and probes are used to assess students' prior knowledge and understanding of optical concepts in real-time.
Anamezie, 2024 [38]	Formal Classroom† Urban	160	Secondary school	The classes were typical secondary school settings, with regular teachers, supervised by the researcher, emphasizing a formal classroom environment.
Chu, 2014 [39]	Formal Classroom† Urban and rural	1149	Secondary school	Classroom settings where students responded to diagnostic test items related to optics concepts, particularly light propagation and object visibility.
Uwamahoro, 2021 [40]	Formal Classroom† Urban	153	Secondary (public)	The learning environment is comprised of traditional classrooms with and without physics laboratories. instruction through conventional methods, while others used digital resources such as PhET simulations,
Tekos, 2009 [41]	Formal Education† (rural and urban)	140	Primary	designed based on constructivist principles, student-centered, collaborative, problem-solving, and task-based with teacher scaffolding.

Afriani, 2019 [42]	Formal Classroom† (public)	20	Junior high school	Incorporated guided inquiry laboratory activities with embedded videos, encouraging active participation, group work, and autonomous learning using multimedia resources and technology

Note. This table reports a subset of the 38 studies included in the qualitative synthesis (see Table 2 and Figure 2). Studies are retained here only when they provide sufficient detail on context, strategies, and outcomes to enable cross-study comparison. Entries conducted strictly in formal-classroom settings are flagged with † and are included only when directly connected to school-based outreach or museum-integrated activities relevant to non-formal learning aims. The complete set of included studies appears in the master list (Appendix/Table S1). Abbreviations: NR = not reported; † = formal-classroom study.

Regarding Research Question 2, Table III summarizes the principal results on the integration of news articles and interactive visualizations in non-formal optics education.

Table IV provides a comparative overview of eleven research articles that investigated the impact of non-formal STEM learning interventions on students' understanding of optical principles. The studies vary in design-ranging from experimental and quasi-experimental to qualitative and exploratory approaches. Learning contexts span diverse environments, including university laboratories, after-school programs, science centers, school classrooms, and museum-integrated programs. Assessment methods include both objective tools (e.g., eye tracking, pre/post-tests) and subjective measures (e.g., surveys, interviews). Across the studies, key learning outcomes reported include enhanced knowledge transfer, scientific curiosity, motivation, critical thinking, problem-solving abilities, and inquiry skills. This table highlights both the methodological diversity and the range of educational settings and outcomes explored in the research corpus.

TABLE IV. Summary of key characteristics of the included studies analyzing the impact of non-formal STEM interventions on students' optical learning.

Paper	Study Design	Learning Context	Assessment Method	Primary Outcomes
Greussing et al., 2020 [43]	Intervention study (experimental, multimethod)	University eye tracking lab (news-based science visualizations)	Eye tracking, cued retrospective reporting, memory test, online/posttest surveys	Knowledge transfer, scientific curiosity, motivation
Johnson et al., 2007 [33]	Intervention study (program description)	After-school programs, science centers, camps, workshops, clubs, classroom	No mention found	Critical thinking, problem solving, inquiry skills
Parno et al., 2019 [44]	Intervention study (quasi experimental, pre/post)	School classroom (grade X, Indonesia)	Pre/posttests (Optical Instrument Problem Solving Skills Test)	Problem Solving abilities
Porto & Zimmerman, 2010 [45]	Qualitative study; case study	Museum exhibit in school (The Museum Goes to School program)	Video recording, observational notes, interviews	Scientific curiosity, motivation
Gorghiu & Santi, 2016 [46]	Exploratory, descriptive study	National program, non-formal science activity	Student feedback questionnaire (post intervention)	Motivation, knowledge transfer, creativity, self-confidence, critical thinking, problem solving, inquiry skills
Martínez, 2022 [47]	Intervention study (quasi experimental, pre/post)	University of Extremadura in Badajoz, Spain (physic lab)	Pre- and post-intervention to evaluate changes in cognitive variables and teaching self-efficacy.	The results revealed statistically significant improvements in both variables-knowledge and teaching self-efficacy-for the group that used STEM tools and hyper-realistic simulations.
Bondani, 2014 [48]		School classroom environment, integrated into existing curricula or as supplementary activities, open days, exhibitions	Use of the "LuNa" teaching methodology based on portable experimental modules for teaching optics	Enhanced student understanding of physical phenomena through hands-on experimentation
Moreno, 2001 [49]	Intervention study socio-historical and cognitive approach	Classroom and laboratory	Evaluation methods include assessments of knowledge and skills through practical activities	Increased motivation through advanced technologies, and strengthening habits and skills related to

			(labs, projects, workshops)	engineering.
Magnani, 2014 [50]	Intervention study (combines artistic activities with teaching concepts of optics)	Elementary School classroom	Artwork and projects like spectroscopes and kaleidoscopes	Enhanced student engagement and interest in learning about light and color
Kim, 2015 [51]	Design-based research	Classroom informal environment focused on science	Qualitative assessment, analysis of multiple data: activity recordings, modeling artifacts, pre- and post-event surveys,	Skill development, improved conceptual understanding
Xu, 2021 [52]	Design-based research, (iterative cycles of design, implementation, evaluation and redesign of pedagogical interventions)	Classroom Primary School	Pre/post tests, design of a periscope	Modest progress in understanding concepts about light,

Focusing on the use of information resources such as interactive visual news in non-formal STEM education settings reinforces previous findings on the effectiveness of non-school interventions in optics learning. Among the studies analyzed, the study by Greussing et al. (2020) stands out as the only one that directly evaluated the effects of animated visualizations based on scientific news. This study demonstrated significant improvements in knowledge transfer, scientific curiosity, and student motivation, as evidenced by memory tests, eye-tracking, and post-intervention surveys [43].

Other studies within the same analysis, although not directly using news-based resources, confirmed that hands-on activities, museum exhibits, and project-based approaches also enhance skills such as critical thinking, problem-solving, creativity, and self-confidence. These findings underscore that contextual authenticity, sustained engagement, and pedagogical flexibility are key elements for achieving meaningful learning in complex topics such as optics.

However, direct evidence on the use of news resources in informal settings remains limited. This highlights an important gap and an opportunity for future research seeking to integrate relevant and accessible media materials into situated pedagogical approaches, especially in rural contexts.

IV. RESULTS

We synthesized 38 studies spanning museums, university labs, after-school/outreach initiatives, summer camps, and school-based/museum-integrated activities. Given the heterogeneity of outcome measures and instruments, we did not conduct a meta-analysis; instead, we present a direction-of-effect synthesis organized by the four research questions (PI1–PI4), with a comparative subset summarized in Table III.

PI1. Conceptual understanding.
Most studies report positive pre–post or comparative gains in conceptual understanding (reflection, refraction, image formation). When reported, effects are larger in programs combining guided inquiry with sustained hands-on work ([e.g., multi-session camps/clubs]) than in single-visit formats. Short, single-session outreach typically shows modest but significant gains.

PI2. News-based and interactive visual resources.
In smaller subset studies, integrating science-news pieces and interactive/animated visualizations is associated with improved knowledge transfer and motivational outcomes (curiosity, self-efficacy). Effects are clearest when visuals are (i) directly mapped to target misconceptions and (ii) embedded in inquiry prompts rather than shown passively.

PI3. Pedagogical features are associated with larger gains.
Across studies, four features recur in higher-gain interventions: (1) perceived authenticity (real-world tasks, community relevance), (2) guided inquiry (explicit scaffolds for prediction–observation–explanation), (3) sustained hands-on intensity (manipulation over multiple sessions), and (4) low-cost materials and simulations (complementary use of tangible artifacts and PhET-like tools). Duration and teacher facilitation quality emerge as consistent moderators.

PI4. Rural vs. urban, Latin America vs. other regions.
Evidence from rural contexts is scarce (<10% of included studies), revealing an equity gap. Available studies suggest that low-cost materials, culturally relevant examples like contextual artifacts, and community-based venues mitigate resource constraints and sustain engagement; however, sample sizes are small and follow-ups rare. Comparative evidence between Latin America and other regions remains limited, warranting cautious interpretation.

Study characteristics
Across the 38 included studies, most were conducted at the lower secondary level (ages 12–15; 17/38, 44.7%) and the upper secondary/high-school level (16–18; 14/38, 36.8%). Primary education accounted for 6/38 (15.8%), and preschool for 1/38 (2.6%). Percentages sum to ~100% due to rounding.
Extraction categories (optics concepts, outcomes/instruments, comparators, pedagogical features) were informed by prior syntheses, including [53].

A. Pedagogical Strategies and Their Impact on Optical Comprehension in Non-Formal Settings

Regarding the pedagogical strategies reported in the analyzed publications, the following stand out:

Diversification of teaching methods: The incorporation of methodologies that include inquiry, experimentation, and discussion promotes a more effective understanding of optical phenomena, in addition to encouraging reflection and meaningful learning [21, 22, 25, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 41, 42]

Active Learning through interactive laboratories and demonstrations: The use of real-time laboratories (RTP) and in-class demonstrations (ILD), where students actively participate in predictions, observations, and data analysis, helps build concepts from practical experiences. These activities encourage collaborative participation and the use of accessible technological resources, even in developing countries. Examples of these activities include students conducting experiments on polarization, birefringence, optical information transmission, diffraction, fluorescence, and scattering. For example, building and manipulating simple telescopes to understand image focusing, or simulating atmospheric distortions using mineral oil to understand adaptive optics [24, 36, 34].

The "Experiment-Guide-Theory" approach: Students conduct basic experiments, receive theoretical explanations, and participate in discussions and innovative experiments. This model promotes active learning, integrates science and practice, and stimulates creativity and critical thinking. Here, teachers design activities in which students first conduct basic experiments, such as studying image formation with lenses or experimenting with different lens configurations to observe the effects produced on image focusing and magnification. Teachers then explain theoretical concepts, and discussion is encouraged to broaden understanding and promote creativity and innovation.[37].

Problem-solving and digital simulation-based teaching: Complementing the curriculum with open resources such as simulations and videos helps overcome difficulties in interpreting optical images and understanding phenomena related to different light sources. At this point, the use of multimedia resources to illustrate complex phenomena that are often difficult to visualize, such as spectral dispersion or interference, facilitates understanding and motivation. On the other hand, the integration of interactive online simulations and videos, such as those from PhET-type platforms, to explore optical phenomena and improve the interpretation of images formed by lenses and mirrors. These resources allow students to experiment virtually and reinforce concepts in contexts where complete physical laboratories are not available [47, 36, 40].

Implementing practical activities and simple experiments: Conducting experiments with low-cost materials, such as adaptive optics, and using visual and kinesthetic models promote a concrete understanding of complex concepts without requiring advanced mathematical knowledge [20, 41, 42].

Active teacher participation and encouragement of dialogue: The teacher's involvement in the different phases of the teaching process, promoting discussion and reflection before, during and after activities, is key to consolidating learning and developing scientific skills [1, 18, 19, 27, 31, 35, 38].

B. Challenges and Opportunities for Optics Education in Rural Contexts Based on Empirical Evidence

In reference to the rural context, it is necessary to carry out more in-depth studies on the effectiveness of active methodologies, since because of this review, less than 10% of the studies analyzed were carried out in the rural context. [39, 19, 41].

Rural contexts present unique challenges for optics education, such as limited access to laboratories, technological infrastructure, and specialized teaching materials often constrain students' opportunities to engage in experimental learning. Teachers in these environments may also face difficulties related to insufficient training in modern pedagogical approaches and a lack of professional development opportunities. However, empirical evidence highlights significant opportunities as well: rural settings often encourage the use of locally available resources, foster strong community involvement, and promote innovative, context-driven teaching strategies that make optical concepts more meaningful to students' daily lives. By leveraging these strengths, optics education in rural contexts can be transformed into an inclusive and relevant learning experience, bridging the gap between formal scientific knowledge and student lived realities.

V. DISCUSSION AND FUTURE DIRECTION

Three mechanisms help explain why non-formal optics activities outperform business-as-usual: (1) they lower barriers to entry through tangible, learner-controlled manipulation of phenomena; (2) they increase perceived authenticity, strengthening relevance and persistence; and (3) they externalize invisible processes via simulations/visualizations, reducing cognitive difficulty and enabling productive reasoning about light, images, and waves. Effective programs deliberately stage authenticity, use guided inquiry rather than unguided discovery, and allocate sustained hands-on time. Low-cost materials and simple optical setups—augmented with targeted simulations—are sufficient to produce meaningful gains when aligned to clear learning targets.

A. Mechanisms

Authenticity likely increases situational interest and perceived value; guided inquiry structures cognitive conflict around optics misconceptions; and sustained hands-on practice supports model revision and transfer. Low-cost materials enable repeated manipulation, while simulations make invisible processes (ray paths, interference) observable, reducing intrinsic cognitive load.

B. Limitations

(i) Outcome heterogeneity (different concept inventories and ad-hoc rubrics) limits comparability; (ii) short-term post-tests dominate (few delayed measures); (iii) selection bias in voluntary programs; (iv) under-representation of rural/Latin American contexts; (v) incomplete reporting of facilitator training and intervention fidelity.

C. Implications for practice

- Design for at least two to three sessions with explicit prediction–observation–explanation cycles.
- Tie activities to authentic local contexts (e.g., solar cookers, solar water disinfection, or greenhouse shading) to boost relevance.
- Combine low-cost artifacts (lenses, mirrors, DIY kits) with targeted simulations to address known misconceptions.
- Embed news-based prompts and interactive visuals as catalysts for transfer, not as stand-alone show-and-tell.
- Document facilitator scaffolds and materials list to support reproducibility in low-resource settings.

D. Research agenda

- Rural implementations with adequate power and delayed retention outcomes.
- Standardized, validated optics concept inventories across non-formal contexts.
- Mechanism-focused studies isolating authenticity and hands-on intensity as moderators.
- Longer-term trajectories: persistence in STEM choices after non-formal optics participation.

In addition to the quantitative and qualitative findings that demonstrate improvements in the understanding of optical principles, this study gains further relevance by addressing a broader educational context. First, it contributes to closing the gap between theory and practice by showing that authentic and experimental experiences, hallmarks of non-formal environments, allow optics learning to transcend abstraction and become a tangible, meaningful, and situated experience. This connection to real-world contexts not only fosters conceptual development but also strengthens essential skills such as autonomy, creativity, and collaborative work.

Secondly, this review provides a systematized body of evidence in a field that has traditionally been fragmented. While numerous non-formal education projects exist, few have been analyzed with methodological rigor and from a comparative perspective. By recovering studies with clear design criteria, measurable results, and thematic specificity, this research offers a solid foundation upon which other researchers, educators, and decision-makers can build or reform existing proposals.

Furthermore, the study highlights the democratizing potential of science education beyond the classroom. The experiences analyzed reveal that non-formal environments can bring scientific knowledge closer to traditionally excluded communities, offering accessible, flexible, and culturally relevant spaces. This finding is particularly significant for Latin America, where structural inequalities persist in access to resources, infrastructure, and training in physical sciences.

However, this review also identifies gaps that require attention in future research. These include the lack of longitudinal studies that explore the long-term retention of knowledge, the absence of systematic data on participants' sociocultural contexts, and the underrepresentation of experiences conducted in rural or Indigenous Latin American communities. In response to these gaps, there is a clear need to develop new studies that design, implement, and evaluate non-formal educational initiatives from a contextualized perspective-one that considers not only learning outcomes but also processes of symbolic appropriation, community engagement, and students' perceptions of relevance.

This work not only systematizes what has already been done but also charts a roadmap for what remains to be achieved: an optical education that is lived, questioned, and transformed in every space where learning is possible.

Considering these findings and gaps, we propose the development of a non-formal optics learning activity specifically designed for children in rural communities. This initiative aims to bring scientific knowledge closer to populations that often lack access to laboratory infrastructure and specialized instruction. The activity will be implemented in informal settings such as community centers, public spaces, or during cultural and school fairs and will incorporate locally relevant materials, inquiry-based strategies, and culturally responsive pedagogy.

Beyond teaching optical principles such as reflection, refraction, and light propagation, the project seeks to foster scientific curiosity, critical thinking, and symbolic appropriation of science through storytelling, exploration, and hands-on experimentation. This intervention will also serve as a case study to document the pedagogical design, implementation, and impact of non-formal education in real-world, low-resource environments.

Ultimately, this proposed activity represents a commitment to transforming optics education into an inclusive and community-rooted experience, and to validating the voices and imaginaries of rural children as co-constructors of scientific meaning. Considering draws on STEM education principles to engage students in exploring optical phenomena through the design and testing of simple instruments, such as homemade projectors or pinhole cameras. These hands-on tasks, framed as design challenges, combine physical science content with engineering practices and mathematical reasoning, offering a comprehensive learning experience tailored to the students' sociocultural context.

Recent studies illustrate a range of strategies for integrating non-formal STEM learning resources, revealing that the learning environment plays a crucial role in shaping both the type and intensity of cognitive outcomes [45]. For example, It was found that STEM activities focused on addressing real-life problems promote deep learning in students [14]. In addition, large-scale, multi-venue programs that blended hands-on activities with professional

partnerships across after-school, community, and national settings strategies that supported the development of inquiry skills and critical thinking [54, 46].

Other cases, such as the museum-school integration described in reference [45], bridged formal and non-formal learning to increase curiosity and student engagement. Similarly, Parno et al. demonstrated that project-based STEM learning in formal classrooms can adopt features typical of informal education, fostering problem-solving and conceptual understanding.[49]

These cases collectively suggest that the degree of integration, from isolated interventions to sustained, community-based engagement, directly affects the learning outcomes observed. Hands-on, sustained activities are more likely to promote curiosity, motivation, and practical skills, while short-term or controlled studies tend to yield more limited gains focused on immediate engagement.

This evidence reinforces the rationale for our proposed intervention: to design a sustained, non-formal STEM learning experience in optics, tailored to rural contexts, and rooted in culturally relevant practices and student agency.

Despite its contributions, this review faces several methodological limitations that must be acknowledged. The small number of studies meeting the inclusion criteria reflects a limited research base on non-formal optics education, particularly in rural and Latin American contexts. Additionally, the heterogeneity of methodologies, sample sizes, and learning environments across the selected studies posed challenges for direct comparison and synthesis. Most of the reviewed interventions were short-term and lacked longitudinal follow-up, making it difficult to assess long-term conceptual retention and behavioral impact. Furthermore, few studies provided detailed socio-cultural information about participants, limiting the analysis of contextual variables that may influence learning outcomes. These limitations underscore the need for more systematic, context-sensitive research in this emerging field.

Consequently, this work invites a rethinking of teacher training and curriculum design. Non-formal approaches should not merely be viewed as complementary strategies, but rather as integral components that enrich educational trajectories when systematically incorporated into academic programs, pre-service and in-service teacher training, and public policies aimed at fostering a more equitable, transformative, and context-aware science education.

V. CONCLUSIONS

A review of the literature on optics teaching in non-formal settings and using STEM approaches shows a growing consensus on the effectiveness of active methodologies, interactive visualizations, and situated experiences in promoting critical thinking, curiosity, and conceptual understanding of optical phenomena [1, 21, 19]. Recent studies highlight that students' perception of the authenticity of the learning environment is a determining factor in enhancing motivation and deep learning. It is also recognized that practical experiences-even in non-school settings-can generate significant learning, especially when articulated with models of inquiry, collaborative work, and active reflection.

However, important gaps persist: most studies are conducted in urban or formal settings, with little representation from rural areas and Latin America. Furthermore, although several studies identify alternative conceptions of light (such as associating it solely with the source or the effect), a few proposals transform these findings into concrete, contextualized, and applicable pedagogical strategies in workshops or science outreach settings. We have also observed a weak evaluation of the sustained impact of these interventions and a lack of consideration for the cultural and linguistic frameworks that mediate learning in rural communities.

It is hoped that this will pave the way for filling several of the gaps identified in the literature: generating knowledge about the teaching of optics in informal and rural settings; proposing a replicable methodology that links diagnosis with pedagogical intervention; and positioning rural children as subjects capable of constructing scientific knowledge from their everyday experiences. This opens a path to strengthening epistemic equity in science education and fostering more fair, meaningful, and contextualized educational strategies.

Based on the findings of the systematic review, we propose a STEM-based pedagogical intervention tailored to rural learners and grounded in non-formal learning environments. In this context, we consider it pertinent to design a science workshop that combines experiential learning activities with a diagnostic tool for exploring students' conceptions of light [55]. Drawing on the empirical contributions of Martínez and Suárez-Rodríguez [14], this tool enables the identification of alternative conceptions among rural students, incorporating the sociocultural context as a key pedagogical dimension. Its structure-comprising open-ended questions, culturally contextualized scenarios, and visual prompts-makes it especially suitable for use in community-based and participatory educational settings. Integrating this instrument into the proposed workshop reinforces a student-centered approach and aligns evidence-based active learning strategies.

ACKNOWLEDGEMENTS

We acknowledge the contribution of artificial-intelligence tools that assisted in literature discovery and language refinement. Elicit (AI research assistant) facilitated systematic screening and extraction of data from academic papers. ChatGPT (OpenAI, GPT-5 Thinking) supported the drafting, refinement, and translation of narrative sections. These tools were used critically and under the supervision of the authors. All inclusion/exclusion decisions, data extraction, analyses, and conclusions were performed solely by the authors, who take full responsibility for the content. We also thank the faculty facilitators, participants, and reviewers for their valuable feedback throughout this project.

REFERENCES

[1] Hohrath, S., Abmann, S., Krabbe, H., & Opfermann, M., *Students' perceived authenticity and understanding of authentic research while experimenting in a non-formal learning setting*, European Journal of Psychology of Education **39**, 3325–3349 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10212-024-00810-z>

[2] Herrington, J., & Oliver, R., *An instructional design framework for authentic learning environments*, Educational Technology Research and Development **48**, 23–48 (2000). <https://doi.org/10.1007/BF02319856>

[3] Juárez, A. M., & Bravo, B., *Análisis de estrategias didácticas implementadas a fin de favorecer el aprendizaje de fenómenos ópticos*, Revista Iberoamericana de Educación **69**, 97–116 (2015). <https://doi.org/10.1234/revista.educacion.69.1.97>

[4] Betz, A., Flake, S., Mierwald, M., & Vanderbeke, M., *Modelling authenticity in teaching and learning contexts: A contribution to theory development and empirical investigation of the construct*. In C. K. Looi & J. L. Polman (Eds.), Transforming learning, empowering learners: The International Conference of the Learning Sciences (ICLS) 2016, Volume 2. International Society of the Learning Sciences (2016). <https://repository.isls.org/handle/1/317>

[5] Looi, C. K., Polman, J. L., Cress, U. and Reimann, P. (Eds.). Transforming Learning, Empowering Learners: The International Conference of the Learning Sciences (ICLS) 2016, Volume 2. (International Society of the Learning Sciences, Singapore, 2016). <https://archive.isls.org/conferences/icls/2016/docs/ICLS2016_Volume_2.pdf>

[6] Gulikers, J. T., Kester, L., Kirschner, P. A. & Bastiaens, T. J., *The effect of practical experience on perceptions of assessment authenticity, study approach, and learning outcomes*, Learning and Instruction **18**, 172–186 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2007.02.012>

[7] Nachtigall, V., Rummel, N., & Serova, K., *Authentic does not equal authentic – How students evaluate the authenticity of learning activities in an out-of-school lab*, Unterrichtswissenschaft 4, 299–319 (2018). <https://doi.org/10.1007/s42010-018-0020-1>

[8] Vygotsky, L. S., *Mind in society: The development of higher psychological processes*, (Harvard University Press, USA, 1978).<https://doi.org/10.2307/j.ctvjf9vz4>

[9] Lave, J. & Wenger, E., *Situated learning: Legitimate peripheral participation*, (Cambridge University Press, UK, 1991). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511815355>

[10] Malcolm, J., Hodkinson, P. & Colley, H., *The interrelationships between informal and formal learning*, Journal of Workplace Learning **15**, 313–318 (2003). <https://doi.org/10.1108/13665620310504783>

[11] Cromley, J. G., Perez, T. & Kaplan, A., *Undergraduate STEM achievement and retention: Cognitive, motivational, and institutional factors and solutions*, Policy Insights from the Behavioral and Brain Sciences 3, 4–11 (2016). <https://doi.org/10.1177/23727322156226>

[12] Quito Igllon, C. R., E*laboración de un podcast educativo para motivar el interés sobre la enseñanza-aprendizaje de la física moderna*, (Bachelor's thesis, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, 2024). <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/14226>

[13] Loaiza, A. M., *Contextos rurales: pretexto perfecto para transformar realidades a través de la investigación científica*, Revista Paca **13**, 109–116 (2022). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8740398>

[14] Suárez Rodríguez, C. P., Martínez Ortiz, N., Pérez Santiago, A. O. & Castillo Meraz, R., *Proyecto STEM sobre la generación de energía eléctrica en el río Amajac usando turbinas*, Cultura Científica y Tecnológica **19**, E38–E47 (2022). <https://doi.org/10.20983/culcyt.2022.2.2e.3>

[15] Martínez, J. R. & Suárez-Rodríguez, C. P., *Conceptos acerca de la luz en niños de educación básica.* Scientific Journal SLP, Serie: Enseñanza y Comunicación de la Ciencia **5**SJ, 5 (2017). <http://galia.fc.uaslp.mx/museo/sjslp/EC-1/Scientific%20Journal%20SLP%205SJ.pdf>

[16] Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J, & Altman, D. G., *Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement*, BMJ (Online) **339**,332–336 (2009).<https://doi.org/10.1136/bmj.b2535>

[17] Urrútia, G. & Bonfill, X., *Declaración PRISMA: Una propuesta para mejorar la publicación de revisiones sistemáticas y metaanálisis*, Medicina Clínica **135**, 507–511 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.medcli.2010.01.015>

[18] Rathi, M., et al., *Innovative approach of teaching ray-optics in the classroom.* Physics Education **59**, 055019 (2024). <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ad6969>

[19] Raju Esakkimuthu, M., Badrinath, V. C. & Kumar, R., *Outcome based learning of optics in schools*. Proceedings of SPIE 9188, Optics Education and Outreach **III**, 91880R (2014). <https://doi.org/10.1117/12.2061998>

[20] Semenova, I., *Teaching optics to primary school children*, International Topical Meeting on Education and Training in Optics and Photonics **9664**, (2005). <https://doi.org/10.1117/12.2207779>

[21] Isma, A., & Nurlaela, A., *The influence of cognitive apprenticeship learning models on students' problem-solving skills in optical instruments*, AIP Conference Proceedings **3058**, 020026 (2024). <[https://doi.org/10.1063/5.0202981>

[22] Udupa, A. & Goddard, L., *Pre-college students learn cross-cutting STEM concepts by building an optical imaging projector*, International Topical Meeting on Education and Training in Optics and Photonics: ETOP **2021**, (2022). <https://doi.org/10.1117/12.2635598>

[23] Efendi, I. & Prima, E., *Implementing project-based learning to improve students' creative disposition, creativity, and understanding in learning light and optics*, Proceedings of the 7th Mathematics, Science, and Computer Science Education International Seminar (MSCEIS 2019), (2020). <https://doi.org/10.4108/eai.12-10-2019.2296416>

[24] Johnson, A., Pompea, S., Arthurs, E. & Tomasello, M. *Hands-on optics (HOO): Making an impact with light*, Education and Training in Optics and Photonics, OSA Technical Digest Series, (2007). <https://doi.org/10.1364/ETOP.2003.EWF1>

[25] Masi, J., *Experiments in optics for younger students by and for older students*, SPIE Proceedings **2525**, (1995). <https://doi.org/10.1117/12.224018>

[26] Catena, D., Michelini, M. & Santi, L., *Upper secondary school students' conceptual learning of optical spectroscopy*. Il Nuovo Cimento **47**, 339 (2024). <https://doi.org/10.1393/ncc/i2024-24339-9>

[27] Kurniawati, L., Aminah, N. S. & Marzuki, A., *Conceptual understanding and consistency level of high school students in optics*, AIP Conference Proceedings **2014**, 020064 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5054468>

[28] Planinić, M., Batinić, N., Bilić, A. & Kelava, A., *Effect of an inquiry-based teaching sequence on secondary school students' understanding of wave optics*, Physical Review Physics Education Research **20**, 010156 (2024). <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.20.010156>

[29] Costa, M. F. M., *The importance of experimentation on teaching the basics of optics at elementary to high school*, SPIE Proceedings **3190**, 228–231 (1997). <https://doi.org/10.1117/12.293051>

[30] Leonard, M. J., Hannahoe, R. M. & Nollmeyer, G. E., *Turning eyes to the big sky: Learning optics in middle school*, (Montana State University, Department of Education, 2012). <https://doi.org/10.1117/12.84810G>

[31] Gero, A. & Zach, E., *High school programme in electro-optics: A case study on interdisciplinary learning and systems thinking*, International Journal of Engineering Education **30**, 1195–1208 (2014). <https://doi.org/10.1111/bjep.12018>

[32] Leonard, M. J., Hannahoe, R. M., Nollmeyer, G. E. & Shaw, J. A., *Teaching and learning geometric optics in middle school through the Turning Eyes to the Big Sky project*, Optical Engineering **52**, 069001 (2013).

[33] Johnson, A., Pompea, S., Arthurs, E. & Tomasello, M., *Hands-on optics (HOO): Making an impact with light*, Education and Training in Optics and Photonics, (OSA Technical Digest Series, U>SA, 2007). <https://doi.org/10.1364/ETOP.2003.EWF1>

[34] Sparks, R. T., Pompea, S. M., Walker, C. E. & Dokter, E. F. C., *Teaching adaptive optics concepts in the high school classroom using an active engagement, experimental approach*, SPIE Proceedings **7783**, (2010). <https://doi.org/10.1117/12.862633>

[35] Galili, I. & Hazan, A., *Learners' knowledge in optics*. Research in Science Education **30**, 83–99 (2000). <https://doi.org/10.1080/095006900290000>

[36] Ndihokubwayo, K., Uwamahoro, J. & Ndayambaje, I., *Effectiveness of PhET simulations and YouTube videos to improve the learning of optics in Rwandan secondary schools*, African Journal of Research in Mathematics, Science and Technology Education **24**, 253–265 (2020). <https://doi.org/10.1080/18117295.2020.1818042>

[37] Dokter, E. F., Pompea, S. M., Sparks, R. T. & Walker, C. E., *The development of formative assessment probes for optics education*, SPIE Proceedings **7783**, 1–8 (2010). <https://doi.org/10.1117/12.860584>

[38] Anamezie, R. C. & Gumbo, M., *Integrating ethnoscience into optics teaching: Impact on students' retention, engagement, and learning outcomes*, Africa Education Review **20,** 78–92 (2024). https://doi.org/10.1080/18146627.2024.2403684

[39] Chu, K. K., Lim, S. & Wong, W. K., *A comparative study of secondary school students' understanding of optics concepts in Singapore and Korea*, Journal of Science Education and Technology **23**, 238–251 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10956-013-9444-0>

[40] Uwamahoro, J., Ndihokubwayo, K., Ralph, M. & Ndayambaje, I., *Physics students' conceptual understanding of geometric optics revisited*. Journal of Science Education and Technology **30**, 706–718 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10956-021-09913-4>

[41] Tekos, G. & Solomonidou, C., *Constructivist learning and teaching of optics concepts using ICT tools in Greek primary school: A pilot study*, Journal of Science Education and Technology **18**, 415–428 (2009). <https://doi.org/10.1007/s10956-009-9156-1>

[42] Afriani, T., Agustin, R. R. & Eliyawati, *The effect of guided inquiry laboratory activity with video embedded on students' understanding and motivation in learning light and optics*, Journal of Science Learning **2**, 79–84 (2019). <https://doi.org/10.17509/jsl.v2i3.15144>

[43] Greussing, E., Kessler, S. & Boomgaarden, H., *Learning from science news via interactive and animated data visualizations: An investigation combining eye tracking, online survey, and cued retrospective reporting*, Science Communication **46**, 6 (2020). <https://doi.org/10.1177/1075547020962100>

[44] Parno, E. S., Yuliati, L., Widarti, A. N., Ali, M. & Azizah, U., *The influence of STEM-based 7E learning cycle on students' critical and creative thinking skills in physics*, International Journal of Recent Technology and Engineering **8**, 761–769 (2019). <https://doi.org/10.35940/ijrte.B1158.0982S919>

[45] Porto, F., Zimmermann, E. & Hartmann, Â., *Exposições museológicas para aprendizagem de Física em espaços formais de educação: Um estudo de caso*, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **27**, 26-62 (2010). <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2010v27n1p26>

[46] Gorghiu, G. & Santi, E. A., *Applications of experiential learning in science education non-formal contexts*, ICEEPSY 2016: 7ª Conferencia Internacional de Educación y Psicología de la Educación, (2016). <https://doi.org/10.15405/epsbs.2016.11.33>

[47] Martínez-Borreguero, G., Naranjo-Correa, F. L. & Mateos-Núñez, M., *Development of STEM instructional resources for teaching optics to teachers-in-training: Influence on learning and teacher self-efficacy*, Education Sciences **12**, 186 (2022). <https://doi.org/10.3390/educsci12030186>

[48] Bondani, M., Allevi, A., Nardo, L. & Favale, F., *The "LuNa" Project: Experimental didactic modules exploiting portable setups to teach optics in primary and secondary schools*, SPIE Proceedings, 9289,92892D, (2014). <https://doi.org/10.1117/12.2070730>

[49] Moreno Yeras, A. & Gonzalez Peña, R., *Optics teaching: New content and methods*, (Higher Institute of Technology "José Antonio Echeverría", Cuba, 2001).

[50] Magnani, N. J. & Donnelly, J., *A colorful approach to teaching optics*, SPIE Proceedings **9188**, 91880L (2014). <https://doi.org/10.1117/12.2060199>

[51] Kim, M. S. & Ye, X., *Authentic learning experiences in informal science learning: A case study of Singapore's prospective teachers*. *In Y. H. Cho et al. (Eds.), Authentic*

problem solving and learning in the 21st century, (Springer Singapore, 2015), pp. 285–306.

[52] Xu, L., Yates, S. & Hennessy, S., *Challenges in designing interdisciplinary science and mathematics instruction: A focus on light phenomena*, International Journal of Science Education **43**, 844-867 (2021). <https://doi.org/10.1080/09500693.2021.1889070>

[53] Margot, K. C., & Kettler, T., *Teachers' perception of STEM integration and education: a systematic literature review*, International Journal of STEM Education **6**, 2 (2019). < https://doi.org/10.1186/s40594-018-0151-2>

[54] Prayogi, S., & Yuanita, L., *Critical inquiry-based learning: A model of learning to promote critical thinking among prospective teachers of physics*, Journal of Turkish Science Education **15**, 43–56 (2018). <https://eric.ed.gov/?id=EJ1344529>

[55] Arboleda-Hernández, L. C., Suárez Rodríguez, C. P. & Becerra Rodríguez, D. F., *Looking for alternative conceptions about light in Colombian rural students*. Proceedings 2475–2483 (2022). <https://doi.org/10.21125/iceri.2022.0619>