

International Journal of Information Science
and Technological Applications-UAS

IJISTA



Diciembre 2024-Mayo 2025 Vol. I Núm. I

U N I V E R S I D A D A U T Ó N O M A D E S I N A L O A



ISSN (en trámite)

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

**International Journal of Information Science
and Technological Applications-UAS**

IJISTA

Vol. 1. Núm. 1, Mayo 2025. ISSN (en trámite)

R E V I S T A

Facultad de Informática Culiacán

<https://revistas.uas.edu.mx/index.php/IJISTA/index>



Culiacán de Rosales, Sinaloa, México.

DIRECTORIO INSTITUCIONAL

Dr. Jesús Madueña Molina

Rector

Dra. Armida Llamas Estrada

Secretario General

Dr. Alfonso Mercado Gómez

Director de Servicios Escolares

Dr. Jorge Milán Carrillo

Secretario Académico Universitario

Dr. Wenseslao Plata Rocha

Vicerrector de Unidad Regional Centro

Dr. Mario Nieves Soto

Director General Investigación y Posgrado

Dr. Joel Cuadras Urías

Director General del Sistema Bibliotecario

Dr. Roberto Bernal Guadiana

Director de la Facultad de Informática Culiacán

Dra. Xiomara Penélope Zaldívar Colado

Editora en Jefe de la Revista IJISTA-UAS

Comité Editorial

Dr. Roberto Bernal Guadiana
roberto.bernal@uas.edu.mx
Director de la Revista

Dra. Xiomara Penélope Zaldívar Colado
editor.ijista@uas.edu.mx
Editor en Jefe

Dr. José de Jesús Uriarte Adrian
admi.ijista@uas.edu.mx
Administrador Open Journal System

Dr. Zeus del Valle Castillo Nájera
gestor.ijista@uas.edu.mx
Gestor Editorial

MC. Thania Roxaana Félix González
difusion.ijista@uas.edu.mx
Editor de Difusión y Comunicación

Dr. Ulises Zaldívar Colado
uzaldivar@uas.edu.mx
Corrector de Estilo

Lic. Vladimir Nieves Cázarez
traductor.ijista@info.uas.edu.mx
Traductor

Lic. Oscar Mejía Quintero
Diseñador y Maquetado

Comité Editorial

Dr. Zeus del Valle Castillo Nájera (UAS)
zeus@uas.edu.mx

MC. Thania Roxaana Félix González (UAS)
thaniafelix@uas.edu.mx

Dr. Juan Francisco Figueroa Pérez (UAS)
juanfco.figueroa@uas.edu.mx

Dr. Ulises Zaldívar Colado (UAS)
uzaldivar@uas.edu.mx

Dr. Topacio Osuna Altamirano (UAS)
topacio@uas.edu.mx

Dra. María Guadalupe Soto Decuir (UAS)
lupita.soto.decuir@uas.edu.mx

Dra. María del Rosario Salmán Valdez (UAS)
chayitosalman@uas.edu.mx

Dr. Humberto Rodríguez López (UAS)
humbertorl@uas.edu.mx

Dra. Natividad Cobarrubias Soto (UAS)
natividadcs@uas.edu.mx

Comité Científico

Dr. Inés Fernando Vega López (UAS)
ifvega@uas.edu.mx

Dr. Pedro Luis Manuel Podesta Lerma (UAS)
podesta.pedro@uas.edu.mx

Dr. Juan Cayetano Niebla Zatarain (UAdeO)
juan.niebla@uadeo.mx

Dra. Dora Aydee Rodríguez Vega (UPSIN)
drodriguez@upsin.edu.mx

Dr. Juan Manuel Ibarra Zannatha (CINVESTAV-IPN)
jibarra@cinvestav.mx

Dr. Amilcar Meneses Viveros (CINVESTAV-IPN)
amilcar.meneses@cinvestav.mx

Dr. Juan Antonio Aguilar Rodríguez (UAdeO)
juan.aguilar@uadeo.mx

Dr. Oscar Lozano Carrillo (UAM)
exato@azc.uam.mx

Dr. José Ángel González Fraga (UABC)
angel_fraga@uabc.edu.mx

MC. Elena Muñoz España (Universidad del Cauca, Colombia)
elenam@unicauca.edu.co

Dra. Graciela Rodríguez Vega (UNISON)
graciela.rodriguez@unison.mx

Cintillo Legal

International Journal of Information Science and Technological Applications-UAS IJISTA, es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma de Sinaloa, a través de la Facultad de Informática Culiacán, Dirección: C. Josefa Ortiz de Domínguez S/N, Cd Universitaria, Ciudad Universitaria, 80013, Culiacán Rosales, Sinaloa, México. Tel. 667 716 1361. <https://revistas.uas.edu.mx/index.php/IJISTA>, editor.ijista@uas.edu.mx, Editora responsable: Dra. Xiomara Penélope Zaldívar Colado. Reservas de Derecho al Uso Exclusivo: en trámite, ISSN (en trámite), ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derechos de Autor. Las opiniones expresadas por los autores no reflejan la postura del editor de la publicación. Todos los artículos son de creación original del autor, por lo que esta revista se deslinda de cualquier situación legal derivada por plagios, copias parciales o totales de otros artículos ya publicados y la responsabilidad legal recaerá directamente en el autor del artículo.

Cada manuscrito está bajo la licencia Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>

CONTENIDO

Editorial

Carta del Editor

Dra. Xiomara Penélope Zaldívar Colado

08 – 09

Artículos Científicos

Artificial Intelligence Applications for Sustainable Water Management: A Systematic Review of the Literature

Pérez-Aguilar, L.Y., Jiménez-Bernal, C.I., López-Sotelo, Y., López-Osorio, R. F.

10 – 20

Detección de Precursores Sísmicos con un Sistema Embebido de Bajo Costo

Becerra-Jiménez, J.A., Millán-Almaraz, J.R., Vázquez-Becerra, G.E., Pio-Rodríguez, G.

21 – 31

Investigación y diseño de software basado en la teoría de matroides orientadas

Estrada Aguayo, E.R., Montoya Urzúa, C.F.

32 – 45

Lenguajes de programación para la estadística: R, Python y Julia.

Bueno-Rivera, R., Quevedo-García, R., Aguilar-Quiroz, J.A., López-Tirado, J.J., Ramírez-Noriega, A.

46 – 51

Manipulación gestual de robots mediante visión artificial

González-Sarabia, A.L., Domínguez-Ulloa, C.M.

52 – 57

Editorial

Carta del Editor

Apreciada comunidad académica, investigadores, lectores y colaboradores de IJISTA:

Es un honor dirigirme a ustedes para dar la bienvenida al primer número de la revista International Journal of Information Science and Technological Applications-UAS IJISTA, una publicación multidisciplinaria editada por la Facultad de Informática de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Este lanzamiento marca un momento significativo: el inicio de una plataforma científica que busca tender puentes entre la investigación tecnológica y las necesidades sociales, entre el rigor académico y la innovación aplicada.

Desde su concepción, IJISTA ha tenido como objetivo crear un espacio riguroso, abierto y accesible para la divulgación de investigaciones en el amplio campo de las ciencias de la información y sus aplicaciones tecnológicas. Hoy, con la publicación de este número inaugural, celebramos el cumplimiento de esa misión inicial con entusiasmo y compromiso renovado.

Este primer número reúne trabajos que representan la diversidad, profundidad y pertinencia que buscamos promover. Los artículos publicados abordan problemáticas complejas con soluciones innovadoras: desde la detección de precursores sísmicos mediante sistemas embebidos de bajo costo, hasta la aplicación de inteligencia artificial en la gestión sostenible del agua, el desarrollo de software matemático para matroides orientadas, y el análisis comparativo de lenguajes de programación aplicados a la estadística.

Estos estudios no solo demuestran excelencia técnica, sino también sensibilidad hacia contextos donde el acceso a herramientas tecnológicas sigue siendo desigual. Nos alienta ver cómo los autores integran conocimiento multidisciplinar con una clara orientación al impacto social, educativo y ambiental. La convergencia entre sistemas de monitoreo accesibles (Becerra-Jiménez et al., 2025), inteligencia artificial con responsabilidad ambiental (Pérez-Aguilar et al., 2025), modelos matemáticos aplicados a la computación (Estrada Aguayo & Montoya Urzúa, 2025), y la formación estadística mediante lenguajes adecuados (Bueno-Rivera et al., 2025) reafirma nuestra apuesta editorial por una ciencia que sea útil, ética y transformadora.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a quienes han hecho posible esta primera edición:

Al Dr. Jesús Madueña Molina, Rector de nuestra Institución, por su invaluable apoyo, su Visión de Futuro y liderazgo, han sido fuente de inspiración para la realización de esta revista. En su Plan de Desarrollo Institucional muy acertadamente plasma en uno de sus ejes estratégicos: “Promover la divulgación, tanto en medios escritos como digitales, del quehacer científico, del desarrollo tecnológico y de las artes”. Agradecemos profundamente su compromiso con la difusión del conocimiento.

Al Dr. Wenseslao Plata Rocha, Vicerrector de la Unidad Regional Centro, el apoyo que siempre nos brinda ha sido crucial para la publicación de este número.

Al Dr. Mario Nieves Soto, Director General de Investigación y Posgrado, por su apoyo constante a la investigación y la difusión de sus resultados.

Al Dr. Joel Cuadras Urías, Director General del Sistema Bibliotecario, por el espacio y la capacitación proporcionada para concretar exitosamente esta revista.

Al Dr. Roberto Bernal Guadiana, Director de la Facultad de Informática Culiacán, por depositar su confianza en este equipo editorial, su respaldo ha sido fundamental para culminar exitosamente esta encomienda.

A los autores y autoras, gracias por confiar en IJISTA como vehículo para compartir su trabajo con la comunidad académica internacional. Su compromiso con la rigurosidad y la innovación es el motor de esta publicación.

A nuestros lectores, quienes a partir de este número se integran a una comunidad en construcción. Cada lectura, cada descarga y cada conversación generada a partir de estos artículos contribuirá a nutrir un ecosistema de pensamiento crítico y colaboración científica.

Al comité editorial y científico, cuyo trabajo silencioso ha sido fundamental para asegurar la calidad de los artículos. Las revisiones expertas, las sugerencias argumentadas y el criterio ético que han sostenido este proceso editorial nos permiten afirmar que IJISTA nace con estándares sólidos, orientados a la excelencia.

A la Universidad Autónoma de Sinaloa, por respaldar este proyecto como parte de su compromiso con la ciencia abierta, la educación de calidad y la democratización del conocimiento.

Y, especialmente, al equipo editorial de la Facultad de Informática de Culiacán, por su dedicación constante. Gracias por convertir una idea en una publicación real, por cuidar cada detalle y por proyectar una revista que aspira a ser reconocida por su solidez, su coherencia y su apertura al diálogo multidisciplinario.

Estamos convencidos de que IJISTA será un medio valioso para investigadores, docentes, estudiantes y profesionales de las ciencias computacionales, tecnológicas y sociales. En un momento donde los desafíos globales exigen pensamiento complejo y cooperación transdisciplinaria, esta revista nace como una herramienta que amplifica voces, promueve conocimiento situado y articula soluciones responsables.

Los invito a leer, compartir y reflexionar a partir de los contenidos de este primer número. Y, sobre todo, los invito a ser parte activa de esta comunidad científica en formación: enviando sus investigaciones, proponiendo temas emergentes, recomendando IJISTA a colegas, o participando en próximas convocatorias.

Con gratitud, entusiasmo y profunda convicción en el poder del conocimiento colaborativo, les doy la bienvenida a esta nueva etapa editorial.

Con aprecio,

Dra. Xiomara Penélope Zaldívar Colado

Editora en Jefe

International Journal of Information Science and Technological Applications-UAS IJISTA

Artificial Intelligence Applications for Sustainable Water Management: A Systematic Review of the Literature

Lidia Yadira Pérez-Aguilar¹, Cynthia Itzel Jiménez-Bernal¹, Yareli López-Sotelo¹, Ramón Fernando López-Osorio¹

¹Facultad de Informática Culiacán, Universidad Autónoma de Sinaloa, México.

Autor de Correspondencia: Ramón Fernando López-Osorio, ferrlop@uas.edu.mx, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0981-5539>

Recibido: Enero 2025, **Aceptado:** Marzo 2025, **Publicado:** Mayo 2025

Resumen:

Introducción. La gestión eficiente de los recursos hídricos es crucial ante el cambio climático y la creciente demanda de agua. La inteligencia artificial se perfila como una herramienta clave para optimizar y hacer más sostenible su gestión. Este artículo examina la aplicación de la IA en la gestión del agua, destacando sus beneficios, desafíos e implementación. **Trabajo relacionado:** Estudios previos han explorado la IA en el modelado predictivo, los sistemas de monitoreo y la toma de decisiones. Sin embargo, su adopción práctica sigue siendo limitada debido a barreras técnicas y socioeconómicas. **Metodología:** Este estudio realizó una revisión bibliográfica sobre la aplicación de la inteligencia artificial en la gestión del agua, analizando investigaciones teóricas y estudios de caso, y centrándose en tecnologías y contextos de aplicación. **Resultados:** Los resultados muestran que la IA puede optimizar el uso del agua y mejorar la respuesta ante emergencias, pero enfrenta limitaciones en la disponibilidad de datos y el acceso a la tecnología. **Análisis de resultados:** A pesar de su potencial, la implementación de la inteligencia artificial enfrenta desafíos, como la calidad de los datos y la accesibilidad a la tecnología. **Conclusiones:** La inteligencia artificial tiene un gran potencial, pero es necesario superar desafíos como la calidad de los datos y un mejor acceso a la tecnología para maximizar sus beneficios.

Palabras Clave: Gestión sostenible del agua, inteligencia artificial, cambio climático, pronóstico del agua.

Abstract:

Introduction. Efficient management of water resources is crucial in the face of climate change and increasing water demand. Artificial intelligence emerges as a key tool to optimize and make its management more sustainable. This paper examines the application of AI in water management, highlighting benefits, challenges, and implementation. **Related Work:** Previous studies have explored AI in predictive modeling, monitoring systems, and decision-making. However, its practical adoption remains limited because of technical and socioeconomic barriers. **Methodology:** This study conducted a literature review on the application of AI in water management, analyzing theoretical research and case studies, and focusing on technologies and application contexts. **Results:** The results show AI can optimize water use and improve emergency response but face limitations in data availability and access to technology. **Analysis of Results:** Despite its potential, AI implementation faces challenges, such as data quality and technology accessibility. **Conclusions.** AI has great potential, but challenges such as data quality and improved access to technology need to be overcome to maximize its benefits.

Keywords: Sustainable water management, artificial intelligence, climate change, water forecasting.

1. Introduction

Sustainable water management is a fundamental pillar in climate change, given that this essential resource is facing increasingly intense pressures in various regions of the planet [1], [2]. Rising global temperatures, changing weather patterns, and the increasing frequency of extreme events such as droughts and floods have significantly altered natural hydrological cycles [3], [4]. As a result, some areas are experiencing severe water shortages, while others are facing water quality problems because of pollution or overuse of water sources [5]. Faced with these challenges, it is imperative to implement management strategies that guarantee the long-term availability of the resource, protect the integrity of aquatic ecosystems, and ensure water supply for human populations [6], [7].

Water management, from a sustainable approach, not only seeks to respond to scarcity but also promotes resilience to the effects of climate change [8], [9]. Through practices such as conservation, water reuse, and ecosystem protection, it is possible to improve water efficiency and ensure that natural and human systems can adapt to changing climatic conditions [10], [11]. In this scenario, incorporating emerging technologies, such as Artificial Intelligence (AI), represents a key tool to transform traditional water management by enabling the development of predictive models, early warning systems, and intelligent platforms for water distribution and monitoring [12], [13].

Likewise, AI is playing an increasingly central role in water management, offering advanced tools for the analysis, modeling, and prediction of complex phenomena related to the water cycle [14], [15]. Using machine learning algorithms, artificial neural networks, fuzzy logic, and knowledge-based systems, among others, AI allows the optimization of processes such as water use planning, early detection of extreme events such as droughts or floods, management of distribution networks, and real-time water quality control [16], [17]. These capabilities are especially relevant in contexts of water scarcity, pressure on ecosystems, and climate change, where data-driven decision-making is essential [18].

In this same context, AI contributes to strengthening the sustainability of water systems by integrating with technologies such as remote sensing, geographic information systems (GIS) and the Internet of Things (IoT), facilitating the massive collection of spatial and temporal data [19]. This synergy enables the development of intelligent decision support systems that incorporate robust predictive models, adaptable to different climatic and socioeconomic scenarios. Therefore, AI makes water management more efficient and reliable, and it helps

create more open, collaborative, and data-driven decision-making [20], [21].

This research systematically reviews literature on AI applications in sustainable water management, identifying key techniques, application areas, and technological advances. The relevance of the study lies in the need for innovative solutions to address the effects of climate change and pressure on water systems, highlighting the potential of AI to improve decision-making and optimize water management. This review includes only studies published between 2000 and 2025, focusing on AI's practical applications in water management and its integration with emerging technologies like remote sensing, IoT, and GIS.

2. Methodology

This study is based on a systematic literature review conducted according to the guidelines of the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) 2020 protocol [22]. This method ensures transparency, reproducibility, and scientific rigor during all phases of the review process, from protocol definition to critical appraisal and synthesis of the selected studies. The researchers applied specific eligibility criteria, structured search strategies, and a detailed analysis of the included articles [23]. Fig. 1 illustrates the complete methodological process of searching, screening, eligibility assessment, and inclusion of relevant studies.

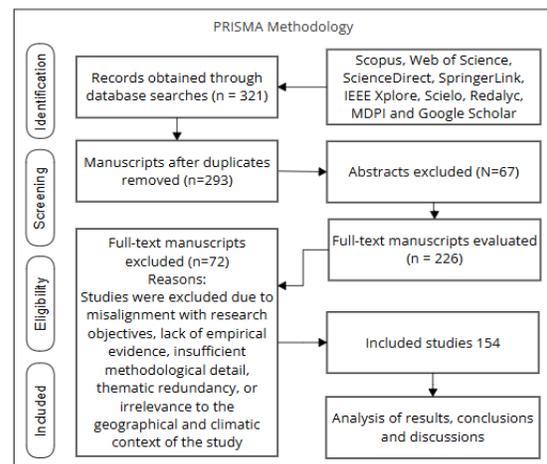


Fig. 1. Methodological outline of the search, selection, screening, eligibility assessment, and inclusion of relevant studies

2.1 Research question and objectives

This review sought to address this fundamental question: How is artificial intelligence being applied in sustainable water management, and what are its benefits, limitations, and emerging areas of application? We set the following

specific objectives: (i) identifying the main AI techniques used, (ii) analyzing the most frequent application areas, such as drought prediction, water quality monitoring, and smart irrigation, and (iii) evaluating synergies with emerging technologies such as remote sensing, geographic information systems (GIS), and the Internet of Things (IoT). The overall purpose was to synthesize empirical and conceptual evidence to identify key trends, knowledge gaps, and promising approaches towards more efficient and resilient water management.

2.2 Search strategy

We conducted the systematic search in English and Spanish using highly affected academic databases, including Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, ScienceDirect, MDPI, and Google Scholar. We considered peer-reviewed articles, book chapters, and institutional papers published between 2000 and 2025. Search strings included Boolean connectors such as (“artificial intelligence” OR “machine learning” OR “deep learning”) AND (“water management” OR “sustainable water use” OR “hydrological modeling” OR “water quality monitoring”), adapted according to the criteria of each database. This strategy allowed a broad and multidisciplinary coverage of scientific literature on AI applied to the water context.

2.3 Inclusion and exclusion criteria and selection process

Rigorous criteria ensured the quality and relevance of the studies analyzed. We included research that addressed practical applications of AI in water management, such as prediction, monitoring, or optimization processes that presented empirical evidence or applied models and that integrated complementary technologies such as sensors, GIS, or IoT. We excluded purely theoretical studies lacking practical application, non-peer-reviewed papers, and those not explicitly focused on water sustainability. The selection process comprised of four stages: identification, screening, eligibility assessment, and final inclusion. After analyzing titles and abstracts, we removed duplicate records from the initial 321, leaving 226 articles. The complete evaluation of the content finally made it possible to include 154 studies that met the objectives and criteria established for this review.

3. Results

3.1 Bibliometric analysis: temporal, geographical and institutional distribution of studies

The bibliometric analysis conducted on the 154 studies included in this systematic review revealed an increasing trend in scientific production related to AI applications in sustainable water management, especially from 2018 onwards, with a significant peak of

publications in 2022 and 2023, coinciding with the increased availability of hydrological data, the advancement in machine learning algorithms, and the growing global concern about water scarcity and climate change.

In terms of geographic distribution, there was a greater concentration of studies in countries such as China, the United States, India, and Australia, followed by European countries such as Spain, Italy, and Germany. These regions stand out for their technological research capabilities and for facing significant challenges in terms of water resources. In Latin America, Brazil and Mexico lead scientific production in this field, with studies focused on intelligent irrigation systems, watershed monitoring and drought prediction.

In terms of institutional affiliation, universities and research centers specialized in environmental engineering, water sciences, and computational technologies were the main generators of knowledge. Institutions such as Tsinghua University (China), the Indian Institute of Technology (India), the University of California (USA) and the Technical University of Munich (Germany) were among the most cited. We also identified a growing trend of interdisciplinary collaboration between engineering, environmental science, and computer science departments. Table 1 presents all the information.

Table 1. Distribution of studies on AI in water resources management (2000–2025)

Year	No. of Studies	Main Region	Institutions
2000	2	North America	University of California, USGS
2001	1	Asia	University of Tokyo
2002	1	Europe	Technical University of Munich
2003	1	North America	MIT
2004	1	Europe	University of Oxford
2005	1	Asia	Indian Institute of Technology
2006	1	North America	Stanford University
2007	1	Europe	University of Barcelona
2008	1	Asia	Tsinghua University
2009	1	North America	University of California
2010	1	Europe	ETH Zurich
2011	2	Asia	Nanyang Technological University, IIT Delhi
2012	2	North America	USGS, University of Texas
2013	2	Europe	University of Cambridge, TU Delft
2014	3	Asia	Tsinghua University, KAIST

Year	No. of Studies	Main Region	Institutions
2015	4	North America	MIT, University of California, USGS
2016	5	Europe	Technical University of Munich, University of Bologna
2017	6	Asia	IIT Bombay, Tsinghua University, Kyoto University
2018	8	North America	Stanford University, USGS, University of California
2019	10	Europe	University of Oxford, Technical University of Munich, ETH Zurich
2020	12	Asia	Tsinghua University, Indian Institute of Technology, University of Tokyo
2021	15	North America	MIT, University of California, USGS, University of Illinois
2022	16	Europe	Technical University of Munich, University of London, Politecnico di Milano
2023	16	Asia	Tsinghua University, KAIST, IIT Madras
2024	21	North America	University of California, USGS, Stanford, Colorado School of Mines
2025	20	Europe	Technical University of Munich, University of Cambridge, Wageningen University
Total	154		

This bibliometric overview evidences a consolidation of AI as a transversal tool in water management studies, highlighting both its global adoption and its relevance in specific regional contexts where pressure on water resources is more critical.

3.2 Sustainable water management: an integrated approach from environmental, social and technological dimensions

Sustainable water management seeks to balance economic, social, and environmental needs, ensuring the availability of water in sufficient quantity and quality for both present and future generations while protecting the environment and ecosystems [24]. This integrating vision is based on three key dimensions: environmental, which promote the conservation of water sources and biodiversity; social, which encourages community participation and fair access to the resource; and

technological, which acts as a strategic facilitator for the efficiency and sustainability of the water sector [25].

In this context, Information and Communication Technologies (ICTs) offer interactive platforms and mobile applications that strengthen community involvement in decision-making and water monitoring. In addition, their application in agriculture and in the conservation of aquatic ecosystems promotes a more efficient and responsible use of water resources. Overall, technology integration is emerging as an essential catalyst for effective, sustainable, and adaptive water management to emerging challenges [26].

3.3 Artificial Intelligence in Environmental Management

The speedup advance of digital technologies and the resurgence of artificial intelligence (AI) have led to profound transformations in organizational management, especially in contexts where natural resources, such as water, are under increasing pressure. In Latin America, this process implies particular challenges because of structural inequalities and socioeconomic constraints, which require a re-engineering of management strategies and a contextualized technological adaptation. In this sense, it becomes essential for states to implement public policies aimed at the ethical, transparent, and responsible use of AI, especially in strategic sectors such as water, in order to guarantee fundamental rights and long-term sustainability [27].

AI is also emerging as a key tool for driving human development, with applications already generating tangible benefits in several areas. However, this progress also poses challenges, particularly in terms of labor equity and access to technologies. The fear of job losses, especially in vulnerable sectors, highlights the urgency of fostering specialized technical skills and digital capabilities in the population, which would allow a more fair use of these emerging technologies and their effective integration into water management systems [28].

In the agricultural sector, which represents a crucial component of water management, AI offers enormous potential for optimizing the use of resources. Technologies such as drones, big data analysis, and predictive systems enable more efficient irrigation management, better crop planning, and rational use of water resources. These innovations not only increase productivity but also favor the conservation of ecosystems, contributing to a more balanced environmental management. However, for truly effective implementation of artificial intelligence, we must address the associated ethical, social, and technical aspects, ensuring its responsible, inclusive, and sustainable application [29].

3.4 Main AI techniques used in water management

AI has revolutionized the field of water management by introducing automated and predictive methods that enable more efficient, timely, and data-driven decision-making. Among the fundamental techniques used are machine learning and deep learning, which allow modeling time series of rainfall, water flows, and water quality with high accuracy [30]. These models learn patterns from large volumes of historical data, generating predictions useful for anticipating water shortages, managing reservoirs, and optimizing agricultural use of the resource [31].

Another relevant technique is the application of artificial neural networks (ANNs), used to simulate and predict complex phenomena of the hydrological cycle [32], [33]. ANNs are especially useful in contexts where data may be nonlinear or incomplete, as occurs in watersheds that are difficult to monitor [34]. Fuzzy logic systems and genetic algorithms have also found application in irrigation system planning, water stress assessment, and the design of climate change mitigation strategies. These tools allow the integration of socio-environmental and economic variables, improving decision-making from a multidisciplinary approach [35].

AI integrates IoT sensors, satellite image analysis, and predictive algorithms in smart water management platforms for real-time monitoring of distribution networks, leak detection, and drinking water quality management [36]. This technological integration facilitates the transition towards smart, more resilient and sustainable water systems. Experts have incorporated the application of these techniques as an essential component in climate change adaptation plans and in the promotion of sustainable development, particularly in vulnerable regions with infrastructure limitations [37].

3.5 Classification of AI applications in water management

Thematic analysis of the included studies allowed us to classify AI applications in water management into four categories, based on their purpose and implementation context. This classification facilitates understanding the current scope of AI technologies and their contribution to the efficient, resilient, and sustainable use of water resources.

a. Prediction of water availability and demand

A considerable number of studies employ AI models, such as artificial neural networks (ANNs), support vector machines (SVMs), and hybrid models, to predict key hydrological variables such as stream flow, precipitation, and reservoir storage levels [30], [38]. These predictions allow expecting short-, medium-, and long-term water supply and demand, which is crucial for water planning and basin management in contexts of scarcity and climate variability [39], [40].

b. Optimization of irrigation in agriculture

AI has been widely used to develop smart irrigation systems that adjust the amount and frequency of water applied according to weather, crop type, and soil condition [41]. Algorithms based on supervised learning and multi-objective optimization models, integrated with sensor data and IoT platforms, stand out, allowing for improved water efficiency and increased agricultural productivity, especially in arid and semi-arid regions [42], [43].

c. Monitoring and improving water quality

Another significant line of research focuses on the use of AI for real-time analysis of water quality parameters, such as pH, turbidity, dissolved oxygen, and contaminants [44], [45]. These applications use classification and predictive analytics techniques to detect anomalies, identify sources of contamination, and support decision-making in urban water supply systems and aquatic ecosystem conservation [46], [47].

d. Risk management: droughts, floods, and leaks

Currently, several studies apply AI models for the early detection and management of extreme water-related events [30]. Classification algorithms and predictive models are used to expect droughts and floods, as well as to locate and quantify leaks in distribution networks [48], [49]. These tools improve the resilience of water infrastructures and enable faster responses to emergency scenarios [48].

3.6 Technologies and platforms supporting AI

Technological platforms and tools empower AI in water management by amplifying its impact, improving the accuracy, automation and efficiency of water management systems [49], [50]. The main technologies and their application in water resources optimization are presented below.

a. IoT Sensors and Connected Devices

The Internet of Things (IoT) is critical for collecting real-time data, which feeds AI algorithms for informed decision-making in water management [51], [52]. IoT sensors collect key data on water quality and quantity, soil moisture, and flow in irrigation and distribution systems [53], [54]. These include water quality sensors that monitor parameters such as pH and contaminants, flow and water level sensors that measure flow in reservoirs and rivers, and meteorological sensors that detect variables such as precipitation and temperature, helping to predict weather events and optimize the use of water resources [55], [56].

b. Data Analysis and Visualization Platforms

Data analytics and visualization platforms enable AI algorithms to process large volumes of information, extracting patterns and making accurate predictions [57], [58]. Examples of these platforms include Google Earth Engine, which uses satellite imagery and geospatial data to train AI models that analyze water behavior [59], [60]; Esri ArcGIS, which integrates spatial data on water resources and geography, facilitating the creation of predictive models [61]; and Microsoft Azure AI, which offers advanced machine learning tools for water demand prediction, leak detection, and water resource optimization [62], [63].

c. AI-Based Hydrological Models

AI-based hydrological models are essential for simulating and predicting the behavior of water systems, improving water management. They use machine learning algorithms to predict water flows, aquifer levels, and ecosystem response to climate change [64], [65]. Examples of these models include artificial neural networks (ANNs), which predict water resource behavior from historical data [66]; drought prediction models, which help expect dry periods and optimize water use [67], [68]; and hydrodynamic models, which simulate water flow in rivers and reservoirs, improving water distribution and flood protection [30], [69].

d. Intelligent Monitoring and Control Platforms

Smart monitoring and control platforms integrate AI and IoT to automate water management in real-time, optimizing distribution and detecting problems such as leaks, waste, or imbalance in irrigation systems [70]. Examples of these platforms include Smart Water Networks (SWNs), which use connected sensors and AI analytics to improve efficiency and reduce losses in water distribution systems [71]; smart irrigation management platforms, which automatically adjust irrigation systems based on data on humidity, weather, and plant needs, reducing water consumption [72]; and water quality management platforms, which employ IoT sensors and AI to detect contaminants and generate early warnings, avoiding public health problems [73].

e. Climate and Water Prediction Platforms

Integrating of climate prediction platforms with AI makes it possible to expect extreme weather events such as droughts and floods, facilitating the planning and management of water resources [30], [68]. These platforms use predictive models that process large volumes of climate data to forecast affects on water availability, improving decision-making [74]. Examples include ClimateAI, which uses AI to predict future weather patterns and their impact on water resources,

enabling anticipatory management of water reserves [75]; and HydroPredict, which combines AI with weather and climate data to predict river and reservoir flows, contributing to basin management and flood prevention [76]. Integrating these platforms with real-time monitoring systems offers the ability to make dynamic adjustments to water distribution, optimizing its use and minimizing risks [77].

f. Cloud Computing and Big Data

Using cloud computing and Big Data technologies facilitates the processing and storage of large volumes of data related to water management, allowing AI systems to access data in real-time, perform complex analysis and generate accurate predictions [78]. Examples of these technologies include AWS (Amazon Web Services), which offers a robust infrastructure to support AI models in sustainable water management, allowing the processing of large volumes of data in real-time [79], and Google Cloud AI [80], which provides machine learning tools that can be integrated with water management systems, optimizing the distribution and use of the resource through advanced analysis and cloud processing. These resources contribute to more agile and accurate decision-making, improving efficiency in water resources management [81].

*3.7 Practical applications of artificial intelligence in water management***3.7.1 AI based system for drought prediction in hydrological basins**

In a research conducted by Y. Wang and S. Y. Wang and S. Razmjoo created an innovative predictive model combining advanced neural networks and optimization algorithms to forecast drought and water scarcity in hydrological basins. This model aims to improve water resource management by providing more accurate and efficient predictions, promoting more appropriate planning and sustainable use of water, a key resource in the face of climate change challenges [82].

The model uses technologies such as Capsule Neural Networks (CapsNN), which capture spatial and hierarchical relationships in the data, improving the robustness of predictions to variations, and Intelligent Algorithm Optimization (IAO), which dynamically adjusts model parameters to optimize its accuracy and efficiency in complex situations. This technological approach allows for more accurate predictions of drought conditions in watersheds.

Researchers trained and validated the model with historical data on precipitation, soil moisture, temperature, and drought indices from various watersheds. This allowed the model to learn temporal and spatial patterns related to drought events, making it a valuable tool for water resource management, the

development of public policies for climate change adaptation, and implementing early warning systems. This advance in artificial intelligence has great potential to improve the resilience of watersheds to the effects of climate change.

3.7.2 Using AI and IoT for precision irrigation in Dryland agriculture

Daniela Pérez, Katerine Marceles, Eleonora Palta, and Gabriel Elías Chanchi designed the Smart Drip System in their study; it's an automated IoT-based irrigation system for arid zones. This system, oriented towards precision agriculture, seeks to optimize water use and improve agricultural productivity through intelligent irrigation monitoring and control. The architecture used is based on IoT sensors capable of measuring key environmental variables such as soil moisture, temperature, pH, salinity and other climatic factors [83].

For its operation, the system integrates a NodeMCU platform with an ESP8266 chip that enables Wi-Fi connectivity and local data processing, an SD card module for data storage, DHT11 sensors for measuring temperature and humidity, and irrigation motors that activate automatically based on the data received. Through a web platform, farmers can monitor and control irrigation in real time, choosing between manual or timed mode. While the project does not implement an artificial intelligence model as such, the real-time collection and analysis of data lays the groundwork for intelligent decision-making and the future development of predictive models.

The system's results have showed an efficiency improvement of over 80% in blackberry crops, with tangible benefits in arid regions. These include precise irrigation regulation in highly saline soils, a reduction in unnecessary water consumption, lower operating costs because of reduced labor usage, and a significant increase in agricultural sustainability and productivity in water-scarce areas. This type of technological innovation represents a key step toward smarter and more resilient water management.

3.7.3 Real-time water quality monitoring with deep neural networks

A study by the Huangyang Reservoir in Gansu Province, China, implemented a water quality monitoring and prediction system based on deep learning techniques. This reservoir is a vital source of water for irrigation, flood control and human consumption in the region, but faces increasing pressures because of urban pollution and climate change. Researchers developed a predictive model using deep neural networks, specifically the LTSF Linear model, an efficient architecture for multivariate time series [85], to expect critical variations in water quality and enhance resource management.

The system operated with real-time data collected by sensors installed in the reservoir, including parameters such as pH, turbidity, and dissolved oxygen. The system recorded these data at hourly intervals from 2017 to 2023, allowing the model to identify spatial and temporal patterns associated with water quality degradation. Unlike traditional approaches such as ARIMA or LSTM, the LTSF-Linear model reduced the mean square error by 8.55% and the mean absolute error by 10.51%, reflecting a significant improvement in prediction accuracy. This performance makes it a valuable tool for decision-makers and water system operators.

The study found that using deep learning to predict water quality assists in better water resource management, especially in situations where conditions change rapidly and quick action is necessary. The system's ability to expect the evolution of key indicators allows for implementing preventive actions in the event of pollution or resource deterioration, improving the reservoir's resilience. This case successfully shows how artificial intelligence integrates into water management, promoting environmental sustainability and ensuring water security in vulnerable regions.

4. Analysis of Results

Implementing AI in water management offers several key benefits that are critical to improving the efficiency of water use. Predictive models and machine learning algorithms have proven to be effective tools for optimizing water distribution and use, allowing for more accurate demand forecasting and management. According to the reviewed studies, real-time monitoring of water quality and quantity is another significant contribution of AI, enabling rapid responses to incidents such as contamination or infrastructure leaks. This approach not only improves operational efficiency but also promotes long-term sustainability by reducing water waste and ensuring a consistent supply.

Analysis of the bibliometric results also reveals a significant increase in the number of studies since 2000, with a surge in publications beginning in 2015. This growth reflects a growing demand for innovative solutions in water management because of global scarcity issues and the climate crisis. The lack of quality data remains one of the principal obstacles, as AI relies heavily on large volumes of accurate data to train prediction models. In many regions, especially in developing countries, water resources data are incomplete or of inferior quality, making it difficult to build reliable models [84].

The interpretability of AI models remains a significant challenge. Many of the algorithms employed operate as "black boxes," meaning that the decision-making of these systems is not completely transparent. This limits the understanding of the processes involved and generates distrust in their implementation, especially

in large-scale applications. The studies reviewed show that, although the developed models are promising, their practical adoption still faces economic, technical, and social barriers. Many times, the studies presented are theoretical, making their translation into applied and scalable solutions limited.

The geographical analysis of the studies shows that the most advanced regions, such as North America and Europe, have led the way in using AI for water management, while in Asia, Africa, and Latin America, implementation remains more limited. In these locations, differences in infrastructure and technological resources pose a significant challenge to implementing solutions developed in urban or technologically advanced contexts. This highlights the importance of contextualizing technological solutions according to local realities and developing adaptive implementation strategies, especially in regions with fewer resources.

5. Conclusions

The review shows that the application of artificial intelligence (AI) in water management has significant potential to improve the efficiency and sustainability of water resources. Through implementing predictive models and machine learning algorithms, it is possible to optimize water use, improve decision-making, and strengthen emergency response capacity. Key benefits of AI include improved efficient water distribution and real-time monitoring of water quality, resulting in more effective management and the prevention of environmental problems. However, effective global adoption requires addressing significant challenges. These challenges include the availability of quality data, model interpretation, and fair access to the technology. Overcoming these obstacles is critical, especially to make the benefits of AI accessible in the most vulnerable regions, which often face technological limitations.

Despite the great potential that AI holds for improving water management, there are persistent challenges related to data quality and a lack of adequate infrastructure in many regions. AI models rely heavily on large volumes of accurate data, and in regions with inadequate infrastructure, such as many developing countries, this is a significant limitation. Model interpretability remains a major issue; many models operate in an opaque manner, hindering user confidence in their use. Progress in this area is critical because transparent AI-based decision-making is essential for acceptance and effective implementation.

Researchers should continue developing more interpretable and accessible AI models. Creating more transparent models will improve confidence in their practical application and facilitate their implementation in diverse contexts. At the public policy level, it is crucial that policymakers promote initiatives that foster fair

access to advanced technologies, especially in developing countries. This will prevent the technological gap from exacerbating inequalities in water management, ensuring that technological solutions benefit all communities, regardless of their level of development.

Regarding future lines of research, it is essential to focus efforts on improving the quality of water data, especially in regions that lack adequate infrastructure for its collection. Research should advance the creation of AI models that are more inclusive, accessible, and transparent, ensuring their usefulness in both urban and rural settings. Researchers should also delve into real-life case studies in rural contexts and developing countries to better understand the effective implementation of these technologies in diverse socioeconomic contexts. Finally, researchers should conduct more research on how AI affects equity in water access, ensuring technological solutions are both innovative and accessible to all communities.

6. References

- [1] C. Estrela-Segrelles, M. Á. Pérez-Martín, and Q. J. Wang, 'Adapting Water Resources Management to Climate Change in Water-Stressed River Basins—Júcar River Basin Case', *Water*, vol. 16, no. 7, Art. no. 7, Jan. 2024, doi: 10.3390/w16071004.
- [2] M. Ciampittiello, A. Marchetto, and A. Boggero, 'Water Resources Management under Climate Change: A Review', *Sustainability*, vol. 16, no. 9, Art. no. 9, Jan. 2024, doi: 10.3390/su16093590.
- [3] K. Furtak and A. Wolińska, 'The impact of extreme weather events as a consequence of climate change on the soil moisture and on the quality of the soil environment and agriculture – A review', *CATENA*, vol. 231, p. 107378, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.catena.2023.107378.
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Ed., 'Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate', in *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge: Cambridge University Press, 2023, pp. 1513–1766. doi: 10.1017/9781009157896.013.
- [5] G. Howard, R. Calow, A. Macdonald, and J. Bartram, 'Climate Change and Water and Sanitation: Likely Impacts and Emerging Trends for Action', *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 41, no. Volume 41, 2016, pp. 253–276, Oct. 2016, doi: 10.1146/annurev-environ-110615-085856.
- [6] G. M. MacDonald, 'Water, climate change, and sustainability in the southwest', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107, no. 50, pp. 21256–21262, Dec. 2010, doi: 10.1073/pnas.0909651107.
- [7] C. Ringler *et al.*, 'The role of water in transforming food systems', *Global Food Security*, vol. 33, p. 100639, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.gfs.2022.100639.
- [8] 'The United Nations world water development report 2018: nature-based solutions for water - UNESCO Biblioteca Digital'. Accessed: Apr. 14, 2025. [Online]. Available: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261424>
- [9] J. F. Velasco-Muñoz, J. A. Aznar-Sánchez, L. J. Belmonte-Ureña, and I. M. Román-Sánchez, 'Sustainable Water Use in Agriculture: A Review of Worldwide Research', *Sustainability*, vol. 10, no. 4, Art. no. 4, Apr. 2018, doi: 10.3390/su10041084.

- [10] UNESCO, UN-Water, and W. W. A. Programme, *The United Nations World Water Development Report 2020: water and climate change*. UNESCO, 2020. Accessed: Apr. 14, 2025. [Online]. Available: <https://digitallibrary.un.org/record/3892703>
- [11] B. Grizzetti, A. Pisticchi, C. Liqueste, A. Udias, F. Bouraoui, and W. van de Bund, 'Human pressures and ecological status of European rivers', *Sci Rep*, vol. 7, no. 1, p. 205, Mar. 2017, doi: 10.1038/s41598-017-00324-3.
- [12] S. SAVALKAR and N. PATIL, 'Artificial Intelligence in Water Resource Management: The Past, Present and Opportunities thereof', ResearchGate. Accessed: Apr. 14, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/368348809_Artificial_Intelligence_in_Water_Resource_Management_The_Past_Present_and_Opportunities_thereof
- [13] P. Bridgewater, A. Loyau, and D. S. Schmeller, 'The seventh plenary of the intergovernmental platform for biodiversity and ecosystem services (IPBES-7): a global assessment and a reshaping of IPBES', *Biodivers Conserv*, vol. 28, no. 10, pp. 2457–2461, Aug. 2019, doi: 10.1007/s10531-019-01804-w.
- [14] Q. Xu, Y. Shi, J. Bamber, Y. Tuo, R. Ludwig, and X. X. Zhu, 'Physics-aware Machine Learning Revolutionizes Scientific Paradigm for Machine Learning and Process-based Hydrology', Jul. 12, 2024, *arXiv*: arXiv:2310.05227. doi: 10.48550/arXiv.2310.05227.
- [15] A. E. Din Mahmoud, M. Fawzy, and N. Ahmad Khan, *Artificial Intelligence and Modeling for Water Sustainability: Global Challenges*. 2023. Accessed: Apr. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.routledge.com/Artificial-Intelligence-and-Modeling-for-Water-Sustainability-Global-Challenges/Mahmoud-Fawzy-Khan/p/book/9781032197074>
- [16] Y. N. Deshvena and S. M. Deshpande, *Artificial Intelligence For Real-time Water Management*, 02 ed., vol. 11. 2024. Accessed: Apr. 20, 2025. [Online]. Available: <https://journals.stmjournals.com/jowrem/article=2024/view=170546/>
- [17] R. Baena-Navarro, Y. Carriazo-Regino, F. Torres-Hoyos, and J. Pinedo-López, 'Intelligent Prediction and Continuous Monitoring of Water Quality in Aquaculture: Integration of Machine Learning and Internet of Things for Sustainable Management', *Water*, vol. 17, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2025, doi: 10.3390/w17010082.
- [18] Y. Tífha, M. Ennahedh, and N. Debbabi, 'Artificial Intelligence-Based Decision Support System for Groundwater Management Under Climate Change: Application to Mornag Plain in Tunisia', in *Recent Advancements from Aquifers to Skies in Hydrogeology, Geocology, and Atmospheric Sciences*, H. Chenchouni, Z. Zhang, D. S. Bisht, M. Gentilucci, M. Chen, H. I. Chaminé, M. Barbieri, M. K. Jat, J. Rodrigo-Comino, D. Panagoulia, A. Kallel, A. Biswas, V. Turan, J. Knight, A. Çiner, C. Candeias, and Z. A. Ergüler, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 15–20. doi: 10.1007/978-3-031-47079-0_4.
- [19] Samirsinh P Parmar, 'Water Resource Management Using Artificial Intelligence Enabled RS & GIS', Apr. 2023, doi: 10.5281/ZENODO.7878771.
- [20] U. Otamendi, M. Maiza, I. G. Olaizola, B. Sierra, M. Florez, and M. Quartulli, 'Integrated water resource management in the Segura Hydrographic Basin: An artificial intelligence approach', *Journal of Environmental Management*, vol. 370, p. 122526, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.122526.
- [21] T. Takeda, J. Kato, T. Matsumura, T. Murakami, and A. Abeynayaka, 'Governance of Artificial Intelligence in Water and Wastewater Management: The Case Study of Japan', *Hydrology*, vol. 8, no. 3, Art. no. 3, Sep. 2021, doi: 10.3390/hydrology8030120.
- [22] M. J. Page *et al.*, 'The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews', *BMJ*, vol. 372, p. n71, Mar. 2021, doi: 10.1136/bmj.n71.
- [23] M. L. Rethlefsen *et al.*, 'PRISMA-S: an extension to the PRISMA Statement for Reporting Literature Searches in Systematic Reviews', *Systematic Reviews*, vol. 10, no. 1, p. 39, Jan. 2021, doi: 10.1186/s13643-020-01542-z.
- [24] D. E. Green, '¿Qué es la gestión sostenible del agua?', *Sigma Earth*. Accessed: Apr. 25, 2025. [Online]. Available: <https://sigmaearth.com/es/%C2%BFQu%C3%A9-es-la-gesti%C3%B3n-sostenible-del-agua%3F/>
- [25] SERVIR, 'Gestión sostenible del agua'. 2021. [Online]. Available: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2679238/Gesti%C3%B3n%20sostenible%20del%20agua.pdf>
- [26] Red del Agua UNAM, 'Convergencia tecnológica para la gestión sustentable del agua'. 2023.
- [27] V. García Benítez and E. A. Ruvalcaba-Gómez, 'Análisis de las estrategias nacionales de inteligencia artificial en América Latina: Estudio de los enfoques de ética y de derechos humanos', *Revista de Gestión Pública*, vol. 10, no. 1, pp. 5–32, 2021, Accessed: Apr. 25, 2025. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8431842>
- [28] CEPAL, 'Tecnologías digitales para un nuevo futuro', 2021.
- [29] V. Baños-Gonzalez, 'La inteligencia artificial, estudio de su evolución y aplicación en México', *Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, vol. 12, pp. 250–260, Nov. 2024, doi: 10.29057/icbi.v12iEspecial4.13338.
- [30] A. Mosavi, P. Ozturk, and K. Chau, 'Flood Prediction Using Machine Learning Models: Literature Review', *Water*, vol. 10, no. 11, Art. no. 11, Nov. 2018, doi: 10.3390/w10111536.
- [31] S. Gharbia *et al.*, 'Hybrid Data-Driven Models for Hydrological Simulation and Projection on the Catchment Scale', *Sustainability*, vol. 14, no. 7, Art. no. 7, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14074037.
- [32] A. Rogel Rojas, A. Hidalgo Velastegui, F. Castro Solórzano, F. Morales Fiallos, D. Moya Medina, and B. Paredes-Beltran, 'Aplicación de Redes Neuronales Artificiales para la Estimación de Pre-cipitaciones: Caso de Estudio de la Cuenca del Río Pastaza, Ecuador', *Revista Científica y Arbitrada del Observatorio Territorial, Artes y Arquitectura: FINIBUS*, vol. 7, no. 14, pp. 131–146, Jul. 2024, doi: 10.56124/finibus.v7i14.013.
- [33] W. F. L. Vilca, 'Aplicación de Redes Neuronales Artificiales a la Modelización y Previsión de Caudales Medios Mensuales del Río Huancané', 2010.
- [34] A. F. Ruiz Hurtado, 'Estimación de la precipitación en la cuenca hidrográfica del río Bolo con técnicas de inteligencia artificial', Trabajo de grado - Maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2023. Accessed: Apr. 25, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/87439>
- [35] R. Zamani, A. M. A. Ali, and A. Roozbahani, 'Evaluation of Adaptation Scenarios for Climate Change Impacts on Agricultural Water Allocation Using Fuzzy MCDM Methods', *Water Resour Manage*, vol. 34, no. 3, pp. 1093–1110, Feb. 2020, doi: 10.1007/s11269-020-02486-8.
- [36] M. R. A. Shehhi and A. Kaya, 'Time series and machine learning to forecast the water quality from satellite data', Mar. 16, 2020, *arXiv*: arXiv:2003.11923. doi: 10.48550/arXiv.2003.11923.
- [37] W. N. S. Zondo, J. T. Ndoro, and V. Mlambo, 'The Adoption and Impact of Climate-Smart Water Management Technologies in Smallholder Farming Systems of Sub-Saharan Africa: A Systematic Literature Review', *Water*, vol. 16, no. 19, Art. no. 19, Jan. 2024, doi: 10.3390/w16192787.
- [38] J. T. R. N. S. Reddy, and U. D. Acharya, 'Modeling Daily Reference Evapotranspiration from Climate Variables:

- Assessment of Bagging and Boosting Regression Approaches', *Water Resour Manage*, vol. 37, no. 3, pp. 1013–1032, Feb. 2023, doi: 10.1007/s11269-022-03399-4.
- [39] M. M. Mekonnen and A. Y. Hoekstra, 'Four billion people facing severe water scarcity', *Science Advances*, vol. 2, no. 2, p. e1500323, Feb. 2016, doi: 10.1126/sciadv.1500323.
- [40] D. Li and Q. Fu, 'Deep Learning Model-Based Demand Forecasting for Secondary Water Supply in Residential Communities: A Case Study of Shanghai City, China', *IEEE Access*, vol. 12, pp. 38745–38757, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3288817.
- [41] E. M. Raouhi, M. Zouizza, M. Lachgar, Y. Zouani, H. Hrimech, and A. Kartit, 'AIDSII: An AI-based digital system for intelligent irrigation', *Software Impacts*, vol. 17, p. 100574, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.simpa.2023.100574.
- [42] S. Dhal, J. Alvarado, U. Braga-Neto, and B. Wherley, 'Machine learning-based smart irrigation controller for runoff minimization in turfgrass irrigation', *Smart Agricultural Technology*, vol. 9, p. 100569, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.atech.2024.100569.
- [43] F. Mortazavizadeh *et al.*, 'Advances in machine learning for agricultural water management: a review of techniques and applications', *Journal of Hydroinformatics*, vol. 27, no. 3, pp. 474–492, Mar. 2025, doi: 10.2166/hydro.2025.258.
- [44] S. A. Vergina, D. S. Kayalvizhi, D. R. M. Bhavadharini, and K. Devi, 'A Real Time Water Quality Monitoring Using Machine Learning Algorithm', *Clinical Medicine*, vol. 07, no. 08, 2020.
- [45] M. Y. Shams, A. M. Elshewey, E.-S. M. El-kenawy, A. Ibrahim, F. M. Talaat, and Z. Tarek, 'Water quality prediction using machine learning models based on grid search method', *Multimed Tools Appl*, vol. 83, no. 12, pp. 35307–35334, Apr. 2024, doi: 10.1007/s11042-023-16737-4.
- [46] Z. Li *et al.*, 'Applications of machine learning in drinking water quality management: A critical review on water distribution system', *Journal of Cleaner Production*, vol. 481, p. 144171, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.144171.
- [47] R. M. Frincu, 'Artificial intelligence in water quality monitoring: A review of water quality assessment applications', *Water Quality Research Journal*, vol. 60, no. 1, pp. 164–176, Nov. 2024, doi: 10.2166/wqrj.2024.049.
- [48] N. Rane, S. Choudhary, and J. Rane, 'Artificial intelligence for enhancing resilience', *Journal of Applied Artificial Intelligence*, vol. 5, no. 2, Art. no. 2, Sep. 2024, doi: 10.48185/jaai.v5i2.1053.
- [49] C. Wardropper and A. Brookfield, 'Decision-support systems for water management', *Journal of Hydrology*, vol. 610, p. 127928, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.127928.
- [50] Ó. R. Dolling and E. A. V. Castellón, 'Sistema de apoyo a la operación de sistemas hídricos con propósitos múltiples, SA SARH-2000', *Tecnología y ciencias del agua*, vol. 18, no. 1, Art. no. 1, 2003, Accessed: Apr. 21, 2025. [Online]. Available: <https://revistatya.org.mx/index.php/tyca/article/view/970>
- [51] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi, 'Internet of Things for Smart Cities', *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 22–32, Feb. 2014, doi: 10.1109/JIOT.2014.2306328.
- [52] Y. Singh and T. Walingo, 'Smart Water Quality Monitoring with IoT Wireless Sensor Networks', *Sensors*, vol. 24, no. 9, Art. no. 9, Jan. 2024, doi: 10.3390/s24092871.
- [53] L. García, L. Parra, J. M. Jimenez, J. Lloret, and P. Lorenz, 'IoT-Based Smart Irrigation Systems: An Overview on the Recent Trends on Sensors and IoT Systems for Irrigation in Precision Agriculture', *Sensors*, vol. 20, no. 4, Art. no. 4, Jan. 2020, doi: 10.3390/s20041042.
- [54] A. Morchid, R. Jebabra, H. M. Khalid, R. El Alami, H. Qjidaa, and M. Ouazzani Jamil, 'IoT-based smart irrigation management system to enhance agricultural water security using embedded systems, telemetry data, and cloud computing', *Results in Engineering*, vol. 23, p. 102829, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102829.
- [55] K. D., 'A study on artificial intelligence for monitoring smart environments', *Materials Today: Proceedings*, vol. 80, pp. 2009–2013, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2021.06.046.
- [56] T. Miller *et al.*, 'Integrating Artificial Intelligence Agents with the Internet of Things for Enhanced Environmental Monitoring: Applications in Water Quality and Climate Data', *Electronics*, vol. 14, no. 4, Art. no. 4, Jan. 2025, doi: 10.3390/electronics14040696.
- [57] X. Wu, X. Zhu, G.-Q. Wu, and W. Ding, 'Data mining with big data', 2014, Accessed: Apr. 21, 2025. [Online]. Available: <https://www.computer.org/csdl/journal/tk/2014/01/ttk2014010097/13rRUxjQych>
- [58] W. Ouyang, 'Data Visualization in Big Data Analysis: Applications and Future Trends', *Journal of Computer and Communications*, vol. 12, no. 11, Art. no. 11, Oct. 2024, doi: 10.4236/jcc.2024.1211005.
- [59] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, and R. Moore, 'Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone', *Remote Sensing of Environment*, vol. 202, pp. 18–27, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
- [60] H. Tamiminia, B. Salehi, M. Mahdianpari, L. Quackenbush, S. Adeli, and B. Brisco, 'Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 164, pp. 152–170, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001.
- [61] D. G. Tarboton *et al.*, 'HydroShare retrospective: Science and technology advances of a comprehensive data and model publication environment for the water science domain', *Environmental Modelling & Software*, vol. 172, p. 105902, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.envsoft.2023.105902.
- [62] N. Kumar Koditala and P. Shekar Pandey, 'Water Quality Monitoring System Using IoT and Machine Learning', in *2018 International Conference on Research in Intelligent and Computing in Engineering (RICE)*, Aug. 2018, pp. 1–5, doi: 10.1109/RICE.2018.8509050.
- [63] A. U. Egbemhenge *et al.*, 'Revolutionizing water treatment, conservation, and management: Harnessing the power of AI-driven ChatGPT solutions', *Environmental Challenges*, vol. 13, p. 100782, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.envc.2023.100782.
- [64] S. R. O. Marshall, Tran ,Thanh-Nhan-Duc, Tapas ,Mahesh R., and B. Q. and Nguyen, 'Integrating artificial intelligence and machine learning in hydrological modeling for sustainable resource management', *International Journal of River Basin Management*, vol. 0, no. 0, pp. 1–17, 2025, doi: 10.1080/15715124.2025.2478280.
- [65] H. Mosaffa, M. Sadeghi, I. Mallakpour, M. Naghdzadegan Jahromi, and H. R. Pourghasemi, 'Chapter 43 - Application of machine learning algorithms in hydrology', in *Computers in Earth and Environmental Sciences*, H. R. Pourghasemi, Ed., Elsevier, 2022, pp. 585–591, doi: 10.1016/B978-0-323-89861-4.00027-0.
- [66] C. W. Dawson, 'Neural Network Solutions to Flood Estimation at Ungauged Sites', in *Practical Hydroinformatics: Computational Intelligence and Technological Developments in Water Applications*, R. J. Abraham, L. M. See, and D. P. Solomatine, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer, 2008, pp. 49–57, doi: 10.1007/978-3-540-79881-1_4.
- [67] M. S. Oyoualsoud, A. G. Yilmaz, M. Abdallah, and A. Abdeljaber, 'Drought prediction using artificial intelligence models based on climate data and soil moisture', *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, p. 19700, Aug. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-70406-6.

- [68]C. Lalika, A. U. H. Mujahid, M. James, and M. C. S. Lalika, 'Machine learning algorithms for the prediction of drought conditions in the Wami River sub-catchment, Tanzania', *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 53, p. 101794, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.ejrh.2024.101794.
- [69]W. Weber de Melo, I. Iglesias, and J. Pinho, 'Early warning system for floods at estuarine areas: combining artificial intelligence with process-based models', *Nat Hazards*, vol. 121, no. 4, pp. 4615–4638, Mar. 2025, doi: 10.1007/s11069-024-06957-8.
- [70]A. Khanna and S. Kaur, 'Internet of Things (IoT), Applications and Challenges: A Comprehensive Review', *Wireless Pers Commun*, vol. 114, no. 2, pp. 1687–1762, Sep. 2020, doi: 10.1007/s11277-020-07446-4.
- [71]M. Pule, A. Yahya, and J. Chuma, 'Wireless sensor networks: A survey on monitoring water quality', *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 15, no. 6, pp. 562–570, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.jart.2017.07.004.
- [72]M. C. Vuran, A. Salam, R. Wong, and S. Irmak, 'Internet of underground things in precision agriculture: Architecture and technology aspects', *Ad Hoc Networks*, vol. 81, pp. 160–173, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.adhoc.2018.07.017.
- [73]A. L. González, J. A. T. García, and K. R. V. Romero, 'JAKEBOT: IoT Based and Machine Learning Water Quality Monitoring for Rivers.'
- [74]M. Rezaei, M. A. Moghaddam, J. Piri, G. Azizyan, and A. A. Shamsipour, 'Drought prediction using advanced hybrid machine learning for arid and semi-arid environments', *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 29, no. 4, p. 100025, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.kscj.2024.100025.
- [75]S. Calengor, S. P. Katragadda, and J. Steier, 'Adversarial Threats in Climate AI: Navigating Challenges and Crafting Resilience', *Proceedings of the AAAI Symposium Series*, vol. 2, no. 1, Art. no. 1, 2023, doi: 10.1609/aaais.v2i1.27648.
- [76]C. Murphy and H. Meresa, 'HydroPredict: Ensemble River Flow Scenarios for Climate Change Adaptation'. Accessed: Apr. 21, 2025. [Online]. Available: https://www.epa.ie/publications/research/climate-change/Research_Report-453.pdf
- [77]H. M. Forhad *et al.*, 'IoT based real-time water quality monitoring system in water treatment plants (WTPs)', *Heliyon*, vol. 10, no. 23, p. e40746, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e40746.
- [78]C. Parra-López *et al.*, 'Digital technologies for water use and management in agriculture: Recent applications and future outlook', *Agricultural Water Management*, vol. 309, p. 109347, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.agwat.2025.109347.
- [79]S. Hashemipour and M. Ali, 'Amazon Web Services (AWS) – An Overview of the On-Demand Cloud Computing Platform', in *Emerging Technologies in Computing*, M. H. Miraz, P. S. Excell, A. Ware, S. Soomro, and M. Ali, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 40–47. doi: 10.1007/978-3-030-60036-5_3.
- [80]P. Borra, 'The Evolution and Impact of Google Cloud Platform in Machine Learning and AI', Jun. 18, 2024, *Social Science Research Network, Rochester, NY*: 4914163. Accessed: Apr. 21, 2025. [Online]. Available: <https://papers.ssrn.com/abstract=4914163>
- [81]Al-Qaisi, 'Smart Water Systems: The Role of Technology and Engineering in Optimizing Urban Water Resources', *ResearchGate*, Mar. 2025, doi: 10.52783/jisem.v10i21s.3445.
- [82]Y. Wang and S. Razmjoo, 'Prediction of drought hydrological and water scarcity based on optimal artificial intelligence by developing a metaheuristic optimization algorithm', *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 135, p. 103669, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.pce.2024.103669.
- [83]D. O. I. Perez, K. I. Marceles, E. V. I. Palta, and G. E. G. 2 I. U. C. M. del C. Chanchi, 'Sistema de riego con tecnología IoT: Smart Drip System', pp. 121–133, 2019, Accessed: Apr. 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.proquest.com/docview/2348878035?pq-origsite=gscholar&fromopenview=true&sourcecetype=Scholarly%20Journals>
- [84]J. Chen, X. Wei, Y. Liu, C. Zhao, Z. Liu, and Z. Bao, 'Deep Learning for Water Quality Prediction—A Case Study of the Huangyang Reservoir', *Applied Sciences*, vol. 14, no. 19, Art. no. 19, Jan. 2024, doi: 10.3390/app14198755.

Detección de Precursores Sísmicos con un Sistema Embebido de Bajo Costo

Detection of Seismic Precursors with a Low-Cost Embedded System

J.A. Becerra-Jiménez¹, J.R. Millan-Almaraz², GE Vázquez-Becerra³, G. Pio-Rodríguez²

¹Facultad de Computación / Universidad Autónoma de Sinaloa, México.

²Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas / Universidad Autónoma de Sinaloa, México.

³Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio/ Universidad Autónoma de Sinaloa, México.

Autor de Correspondencia: J.A. Becerra-Jiménez, jaimeandres@uas.edu.mx, ORCID: 0009-0007-9816-8010

Recibido: Enero 2025, **Aceptado:** Marzo 2025, **Publicado:** Mayo 2025

Resumen:

Este estudio presenta el desarrollo y evaluación del desempeño de un sistema embebido de bajo costo para la detección de posibles precursoros sísmicos a través del monitoreo del campo geomagnético terrestre. El sistema, basado en un magnetómetro fluxgate y una plataforma de adquisición con Raspberry Pi, permite la obtención de datos crudos con una frecuencia de muestreo de 1 Hz. Se analizaron eventos sísmicos, aplicando técnicas de procesamiento digital como el filtro de media móvil y la DWT. Los resultados obtenidos fueron comparados con registros de la estación geomagnética de Tucson, mostrando patrones anómalos similares previos a los eventos sísmicos, lo que sugiere la viabilidad del sistema propuesto para identificar posibles precursoros sísmicos. Se concluye que este tipo de sistemas puede contribuir a redes de monitoreo más accesibles y escalables para la mitigación de riesgos sísmicos.

Palabras Clave: “monitoreo geomagnético”, “precursoros sísmicos”, “magnetómetro fluxgate”, “filtros digitales”, “transformada wavelet”, “análisis de señales”.

Abstract:

This study presents the development and Performance evaluation of a low-cost embedded system for the detection of potential seismic precursors through monitoring the Earth's geomagnetic field. The system, based on a fluxgate magnetometer and a Raspberry Pi acquisition platform, allows the acquisition of raw data with a sampling rate of 1 Hz. Relevant seismic, applying digital processing techniques such as the moving average filter and the DWT. The results obtained were compared with records from the Tucson geomagnetic station, showing similar anomalous patterns prior to seismic events, suggesting the viability of the proposed system to identify potential seismic precursors. It is concluded that this type of system can contribute to more accessible and scalable monitoring networks for seismic risk mitigation.

Index Terms:

“Geomagnetic monitoring”, “seismic precursors”, “fluxgate magnetometer”, “digital filters”, “wavelet transform”, “signal analysis”.

1. Introducción

En los últimos años, los terremotos han continuado teniendo un impacto significativo a nivel mundial. Por ejemplo, en 2023, el terremoto que afectó a Turquía y Siria resultó en más de 56,000 muertes y pérdidas económicas superiores a los 42 mil millones de dólares [1]. Estos eventos subrayan la necesidad de sistemas de monitoreo sísmico más efectivos y accesibles. A pesar de los avances en geofísica y sismología, la predicción precisa del momento, ubicación y magnitud de un evento sísmico continúa siendo un desafío científico de gran complejidad. Según el informe de EM-DAT, en 2023 se registraron 399 desastres relacionados con peligros naturales, resultando en 86,473 muertes y afectando a 93.1 millones de personas. Las pérdidas económicas ascendieron a 202.7 mil millones de dólares [1]. Otro dato preocupante es cómo los terremotos pueden debilitar las balanzas comerciales y aumentar la deuda pública debido a los costos de reconstrucción [2]. Estos hallazgos refuerzan la importancia de desarrollar sistemas de monitoreo sísmico más eficientes y accesibles.

Ante esta problemática, ha surgido un creciente interés en la identificación de precursores sísmicos, es decir, señales físicas detectables que preceden a un sismo. Entre estos, las anomalías en el campo electromagnético terrestre han sido ampliamente estudiadas como posibles indicadores tempranos de actividad tectónica inminente. Diversos estudios [3], [4]. han reportado correlaciones entre variaciones geomagnéticas y la ocurrencia de eventos sísmicos, lo que ha motivado el desarrollo de sistemas de monitoreo dedicados a este tipo de señales.

Se ha observado que los terremotos pueden estar precedidos por alteraciones en una amplia gama de frecuencias electromagnéticas, incluyendo ULF. Estos fenómenos pueden ser causados por la acumulación de tensiones en las placas tectónicas, movimientos de fluidos subterráneos o la generación de cargas eléctricas en zonas de fractura [5]. Por ejemplo F. Freud comenta los procesos físicos en señales pre-sísmicas, señalando entre ellos cómo la deformación previa al sismo genera campos eléctricos por efecto piezoeléctrico [6].

O también I. Dobrovolsky et al. Hablan de Los procesos de deformación de la corteza ocurren con relativa rapidez cuando aparecen precursores a corto plazo en la etapa preparatoria final de un sismo tectónico, proporcionando información sobre el comportamiento de los precursores a corto plazo en las corrientes telúricas y el campo geomagnético [7].

Por lo tanto, monitorear el campo magnético terrestre de forma continua y con alta sensibilidad se ha convertido en una línea de investigación prometedora para la mitigación de riesgos sísmicos.

Este artículo presenta el diseño, implementación y evaluación del desempeño de un sistema embebido de bajo costo para la detección de precursores sísmicos mediante el análisis de señales geo-electromagnéticas. El

sistema incluye un magnetómetro fluxgate triaxial, un ADC de 32 bits y una plataforma basada en Raspberry Pi para la adquisición y almacenamiento de datos, aunque su tamaño y versatilidad permiten su uso e instalación en otras regiones, el dispositivo se mantuvo operando en las instalaciones de la Universidad Autónoma de Sinaloa.

Se analizaron eventos sísmicos registrados en un periodo comprendido entre 2017 a 2019, en territorio mexicano debido a la disponibilidad de datos de la estación de desarrollo propia, aplicando técnicas de procesamiento digital como el filtro de media móvil y la DWT. Los resultados obtenidos se compararon con datos de la estación internacional de Tucson, evaluando así el desempeño del sistema propuesto.

Este trabajo contribuye al desarrollo de tecnologías accesibles para el monitoreo sísmico, de fácil instalación y uso, abriendo nuevas posibilidades para la detección temprana de eventos geofísicos mediante redes distribuidas de sensores geomagnéticos.

2. Trabajos Relacionados

a. Fundamentos del Monitoreo Geomagnético

El estudio del campo magnético terrestre y su posible relación con la actividad sísmica ha sido objeto de investigación desde hace más de medio siglo. En los años 50, E. H. Vestine propuso teorías fundamentales sobre la interacción entre el campo magnético solar y terrestre [8], lo anterior abrió camino para estudios geomagnéticos en la Tierra.

Durante la Segunda Guerra Mundial, se desarrollaron los primeros sensores fluxgate, inicialmente utilizados para la detección de submarinos. Sin embargo, tras el conflicto, estos sensores encontraron nuevas aplicaciones en la exploración geofísica, la prospección de minerales y la investigación espacial [9]. En 1958, el satélite Sputnik 3 transportó un magnetómetro fluxgate, marcando el inicio de su uso en misiones espaciales.

b. Magnetometría aplicada a eventos sísmicos

Uno de los estudios pioneros en correlacionar señales magnéticas con sismos fue el de M. J. S. Johnston y R. J. Mueller quienes reportaron desplazamientos en el campo magnético durante el terremoto de North Palm Springs (California, 1986), empleando una red de 24 magnetómetros de protones. Observaron variaciones de hasta 1.2 nT a distancias de 3–9 km del epicentro, lo que validó la hipótesis de que los terremotos pueden inducir anomalías magnéticas medibles [10].

Más adelante, el terremoto de Kagoshima (1996) en Japón proporcionó una de las primeras evidencias claras de anomalías ultra baja frecuencia (ULF) antes de un evento sísmico, como reporta S. Uyeda. et al. Estas anomalías han sido asociadas a cargas eléctricas generadas por la fricción de placas tectónicas, difusión de gases o efectos piezoeléctricos [11].

c. *Técnicas de análisis y evolución tecnológica*

El avance en técnicas de procesamiento de señales ha permitido analizar las variaciones geomagnéticas con mayor precisión. Por ejemplo, A. Grinsted. et al. Propusieron el uso de la transformada wavelet para estudiar la coherencia entre señales geofísicas, lo que sentó una base sólida para su uso en la detección de precursores sísmicos [12].

En 2010 A. Baschiroto et al. Presentaron un sistema automático de medición del campo magnético terrestre utilizando un magnetómetro fluxgate integrado en una arquitectura embebida, capaz de capturar tanto la magnitud como la dirección del campo, este dispositivo tenía un rango de hasta $\sim 60 \mu\text{T}$ Precisión angular de $\leq 1.5^\circ$ y una Resolución angular de $\sim 0.5^\circ$ [13].

Posteriormente, investigaciones como las de J. P. Amezcua Sánchez et al. En México utilizaron herramientas como la descomposición en modos empíricos (EMD) y la DWT para identificar señales anómalas previas a terremotos. Estas metodologías han demostrado ser eficaces para detectar patrones no lineales y transitorios, característicos de los precursores sísmicos [14], [15].

d. *Nuevas evidencias y tendencias actuales*

Recientes estudios han reforzado la hipótesis de las anomalías geomagnéticas como precursores confiables. Y. Huang demostró una correlación de hasta 85% entre anomalías magnéticas y eventos sísmicos en Sichuan, China, utilizando un algoritmo que analiza la energía de las señales geomagnéticas [4]. Por otro lado, en el artículo de S. Harrigan et al. Aplicaron técnicas de análisis estocástico para detectar señales pre-sísmicas en los datos satelitales de la misión Swarm [3]. Además, M. Tsutsui en Japón, reportó la detección de ondas electromagnéticas directamente generadas por terremotos [16], mientras que F. Dudkin et al. Analizaron señales en la ionósfera capturadas por microsátélites, corroborando que los sismos generan efectos electromagnéticos observables en altitudes elevadas [17].

e. *Dispositivos de bajo costo para monitoreo geomagnético*

En los últimos años se han propuesto diversos sistemas portátiles y económicos para el monitoreo geomagnético. Entre ellos destacan varios dispositivos, junto con el desarrollado por nosotros, como se puede apreciar en la Tabla 1 uno la comparativa entre nuestro sistema y el mostrado en otras propuestas:

Tabla 1. Comparativa de sistemas similares.

Sistema	Componentes Principales	Aplicación Principal	Ventajas
Sistema propio	Magnetómetro de	Detección de	Procesamiento avanzado

(Este trabajo)	flujo, Raspberry Pi, ADC 32 bits.	precursores sísmicos	(DWT, filtro media móvil), diseñado especialmente para detectar precursores sísmicos.
Three Day Mag [18]	Raspberry Pi Zero sensores COTS	Monitor educativo y ciudadano	Bajo costo, fácil implementación
Magnetómetro PSWS [19]	Sensores Magneto-Inductivos, Cots	Monitor del clima espacial	Alta resolución ($\sim 3 \text{ nT}$)
Dispositivo volcánico [20]	Sensor de flujo, inclinómetro, GPS.	Medición de anomalías magnéticas locales	Bajo costo, portátil.

A diferencia de sistemas como Three Day Mag el cual es de uso educativo con una frecuencia de muestreo de 1 Hz [18] y PSWS una resolución de campo de $\sim 3 \text{ nT}$ a una frecuencia de muestreo de 1 Hz. El rango de medición del sensor es de $\pm 1,1 \times 10^{-1} \text{ nT}$ [19]. El sistema propuesto ofrece una solución de bajo costo con componentes fácilmente disponibles, lo que facilita su implementación en regiones con recursos limitados. Además, su diseño modular permite una fácil expansión y adaptación a diferentes entornos geográficos. Como también está diseñado específicamente para detectar posibles precursores sísmicos, si necesidad de modificación adicional en el sistema.

Adicionalmente nuestro prototipo ofrece 0.1 nT de resolución de sensibilidad, 32 bits de resolución en el ADC y autonomía de operación 24/7 con consumo inferior a 2 W, lo que facilita su despliegue masivo en zonas remotas.

3. Metodología.

a. *Arquitectura General del Sistema*

El sistema propuesto fue diseñado con el objetivo de registrar variaciones del campo magnético terrestre asociadas a posibles precursores sísmicos, mediante una plataforma de adquisición de datos autónoma, de bajo costo y fácil implementación. La arquitectura general está compuesta por un sensor magnetómetro fluxgate triaxial, un convertidor analógico-digital (ADC), una plataforma

embebida para adquisición y almacenamiento de datos, y herramientas de procesamiento digital.

La estación se instaló en un entorno controlado en las instalaciones de la universidad autónoma de Sinaloa, protegido con un gabinete industrial para minimizar interferencias externas, y se operó de manera continua durante varios meses.

b. Componentes Principales

- Magnetómetro Fluxgate (MAG 690-1000): Sensor triaxial con un rango de $\pm 100 \mu\text{T}$ y una resolución de 0.1 nT . Este tipo de sensor ha sido ampliamente validado para mediciones geofísicas de baja frecuencia, dada su estabilidad y sensibilidad.
- ADC (ADS1262): ADC de 32 bits, diseñado y ensamblado por nosotros en una placa tipo *shield* personalizada para su integración con sistemas embebidos. La digitalización se realiza a una frecuencia de muestreo de 1 Hz , suficiente para capturar variaciones ULF del campo magnético.
- Unidad de procesamiento embebida (Raspberry Pi 3): Se empleó como unidad principal para el almacenamiento local, gestión de archivos y operación del sistema de adquisición en tiempo real. Adicionalmente, se realizaron pruebas con plataformas más avanzadas (como la DE0-Nano SoC) para evaluar su potencial en procesamiento paralelo mediante FPGA.
- Gabinete de protección industrial: Para aislar el sistema de interferencias electromagnéticas locales y protegerlo de condiciones ambientales adversas de la marca ABB IP65 de $350\text{mm} \times 260 \text{ mm}$.
- Fuente de alimentación: una fuente de alimentación con salida de $\pm 5 \text{ V}$ especialmente diseñada para alimentar el sensor y el ADC, y evitar variaciones en el suministro eléctrico que pudieran generar ruido en la medición.

La Fig. 1 corresponde al armado del prototipo en su respectivo gabinete industrial en donde se puede apreciar el sensor, la fuente de alimentación de fabricación propia, la tarjeta Shield también de diseño propia y la Raspberry Pi.

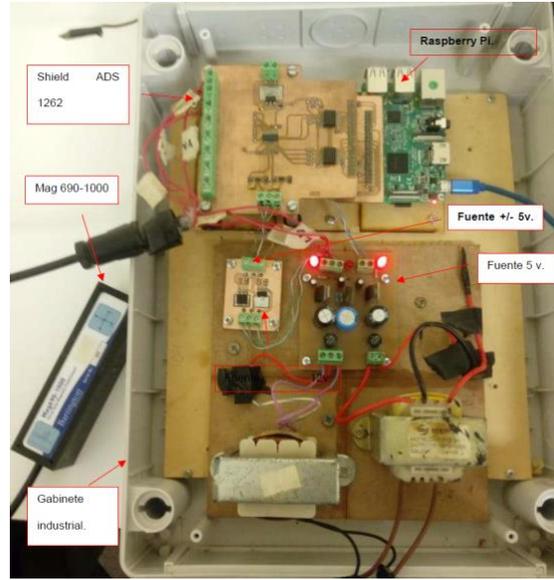


Fig. 1. Estación de monitoreo geo electromagnético.

De igual manera el script utilizado para la adquisición y guardado de datos, fue también desarrollado por nosotros, logrando una medición constante y estable. Para el procesamiento de señales, se implementaron algoritmos existentes de DWT y Filtros media móvil, adaptados a las necesidades específicas del sistema.

c. Adquisición de Datos

El sistema operó de forma casi continua durante el periodo de evaluación, registrando señales en datos crudos y almacenándolas como archivos CSV. Se seleccionaron dos eventos sísmicos en el territorio mexicano: Las Choapas (Veracruz) y Cihuatlán (Jalisco). La validez de los eventos fue confirmada mediante los registros del Servicio Sismológico Nacional.

Para evitar sesgos por perturbaciones de origen solar, se empleó el índice de tiempo de tormenta perturbadora (DST) por sus siglas en inglés, proporcionado por el World Data Center for Geomagnetism (Kyoto, Japón), como criterio para filtrar días de baja actividad geomagnética

d. Procesamiento de Señales

3.4.1 Filtro de Media Móvil

Con el objetivo de reducir el ruido de alta frecuencia no relacionado con fenómenos geofísicos, se aplicó un filtro de media móvil simple con una ventana de 10 muestras. Esta técnica permite atenuar fluctuaciones aleatorias sin distorsionar significativamente la señal principal.

3.4.2. Transformada Wavelet Discreta (DWT)

Posteriormente, se empleó la DWT, utilizando funciones Daubechies de orden 4 (db4), hasta el tercer nivel de descomposición. Esta técnica es efectiva para

identificar patrones transitorios y localizar anomalías en el dominio tiempo-frecuencia. Se analizaron los coeficientes de detalle (D1, D2 y D3), considerando como anomalías potenciales aquellos picos que excedieran la varianza normal de la señal suavizada.

Todo el procesamiento fue realizado en Python y MATLAB, permitiendo visualización gráfica, análisis comparativo.

e. *Comparación con datos externos*

Para comparar los datos obtenidos por el sistema propio, estos se compararon con los registros de la estación geomagnética de Tucson (Arizona, EE. UU.). Dicha estación pertenece a INTERMAGNET, una red global de observatorios magnéticos que monitoriza el campo magnético terrestre. INTERMAGNET proporciona datos precisos, basados en estándares modernos de medición, los cuales son públicos y están disponibles en línea. La red es ampliamente reconocida por la alta calidad y confiabilidad de sus mediciones de campos magnéticos. Esta estación fue seleccionada por su cercanía relativa a México y su cobertura continua durante los eventos analizados. A las señales obtenidas por ambas estaciones (local y externa) se les aplicaron los mismos procedimientos de procesamiento, lo que permitió realizar comparaciones directas entre las series temporales. Se prestó especial atención a las similitudes en patrones anómalos antes, durante y después de los eventos sísmicos.

f. *Selección de eventos sísmicos.*

Para seleccionar los eventos a analizar, se establecieron los siguientes criterios:

- Origen y Magnitud: Se consultó el Servicio Sismológico Nacional de México para identificar sismos con magnitud superior a M5.
- Disponibilidad de Datos: Se verificó que las fechas de estos sismos coincidieran con la disponibilidad de datos en la estación propia y en la de Tucson. Era esencial contar con datos suficientes, continuos y estables durante el evento sísmico, así como en los 4 días anteriores y los 4 días posteriores al mismo.
- Condiciones Geomagnéticas: Se consideró el índice DST. Se seleccionaron eventos donde el índice DST estuviera cercano a 0, lo cual indica condiciones geomagnéticas tranquilas y ayuda a evitar ruido en la medición.

g. *Condiciones de prueba*

- Duración del Experimento: El periodo de operación fue entre 2017 y 2019 casi continuos.
- Ubicación: Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la Universidad Autónoma de Sinaloa, en la Ciudad Universitaria.
- Condiciones de Instalación: Se instaló lejos de cualquier interferencia electromagnética, en

una zona sin humedad y alejada del sol para evitar cualquier posible fallo, el lugar fue acceso controlado y suministro eléctrico constante.

h. *Consideraciones Éticas y Técnicas*

El sistema fue operado bajo estrictas medidas de control eléctrico y de aislamiento magnético. No se requirió el uso de datos personales ni intervención humana directa en la recolección de datos, por lo que no se identifican conflictos éticos en la ejecución de este trabajo.

4. Resultados

a. *Evaluación general del sistema*

El sistema embebido propuesto logró registrar con éxito variaciones geomagnéticas que precedieron a eventos sísmicos. Se analizaron señales provenientes de dos eventos sísmicos.

En las señales de los tres ejes magnéticos (X, Y, Z) se seleccionó el eje que mejor parece respondió a valores anómalos y fueron procesadas aplicando filtro de media móvil y la DWT, con el objetivo de identificar posibles anomalías pre-sísmicas.

b. *Evento 1: Sureste de Salina Cruz, Oaxaca (M6.8)*

- Fecha del evento: 22 de agosto de 2018.
- Coordenadas epicentrales: 15.70° N, 94.98°.
- Magnitud: Mw 6.8.
- Fuente: Servicio Sismológico Nacional.

Las señales captadas por la estación propia (UAS) muestran fluctuaciones notables en el eje X durante las seis horas previas al sismo. En particular, el eje X presentó una variación de hasta 8 nT, lo cual coincide con las observaciones de la estación Tucson para ese mismo periodo en el mismo eje. En la Fig. 2 se puede apreciar los datos crudos obtenidos por la estación UAS en el eje X.

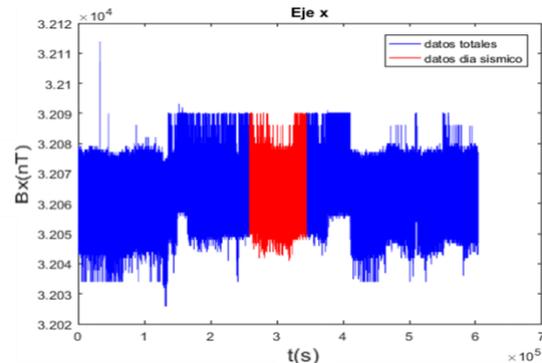


Fig. 2. Datos estación UAS. Eje x evento sísmico del sureste de salina cruz.

También se toman los datos de la estación Tucson del eje X para poder comparar con la estación UAS, como se muestra en la Fig. 3 los datos crudos:

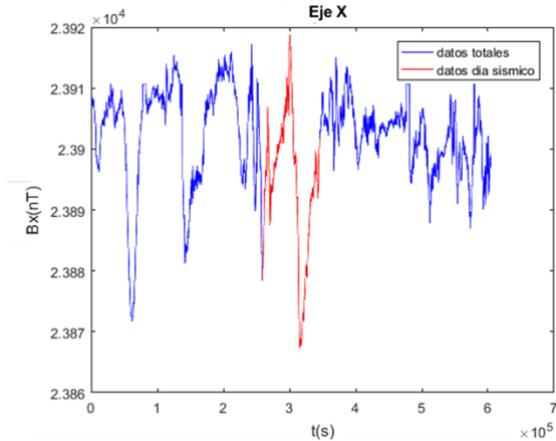


Fig. 3. Datos estación Tucson eje X evento del sureste de salina cruz.

Una vez obtenido los datos crudos, de los ejes X para este caso, se aplicó tanto el filtro medio móvil como el DWT obteniendo la Fig. 4 la cual corresponde a los datos de la estación UAS aplicando los filtros antes mencionados y la Fig. 5 corresponde a los datos de la estación Tucson, respectivamente.

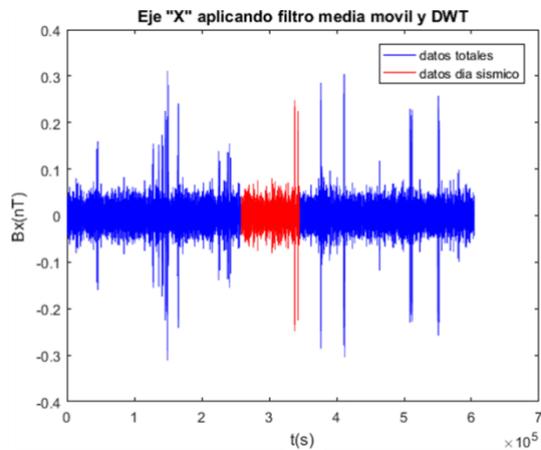


Fig. 4. Datos estación UAS. Eje X filtro media móvil y DWT evento del sureste de salina cruz.

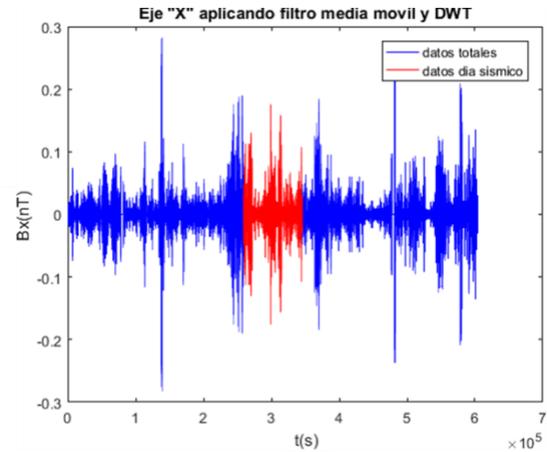


Fig. 5. Datos estación Tucson, eje X filtro media móvil y DWT del evento del sureste de salina cruz.

Tras aplicar DWT, se identificaron tres picos anómalos en los coeficientes de detalle (nivel D2), con morfología similar al evento principal. Estas anomalías aparecen entre 2 y 6 horas antes del sismo. El patrón de “precursor tipo explosión” observado es coherente con lo reportado por O. Chavez et al. Quienes identificaron eventos similares utilizando técnicas DWT [15] y también como menciona S. Uyeda pueden ser detectadas en este tipo de señales [21]. Como se marcan en la Fig. 6, los posibles eventos detectados según la literatura y cotejados con los datos de la estación Tucson al inspeccionar los resultados en las gráficas al aplicar DWT.

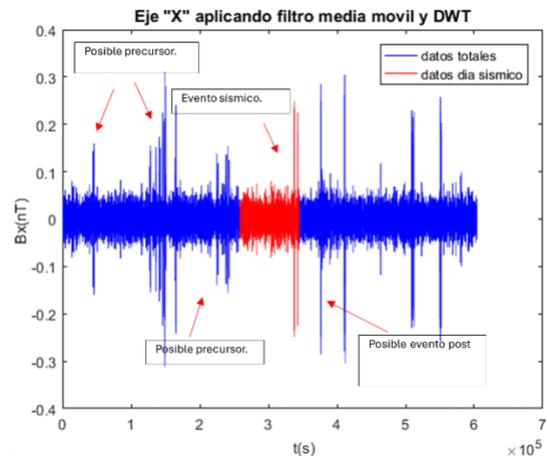


Fig. 6. Datos estación UAS. Eje X filtro media móvil y DWT evento del sureste de salina cruz, mostrando posibles anomalías.

Al igual en la Fig. 8, se pueden apreciar varios eventos anómalos de la estación Tucson que tienen similitudes con la estación UAS y la literatura antes mencionada.

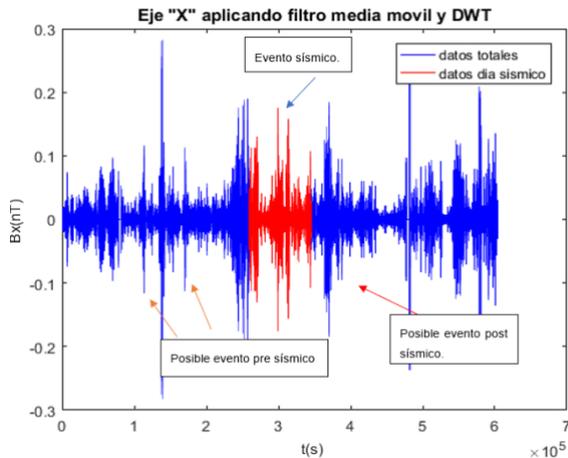


Fig. 7. Datos estación Tucson, eje X filtro media móvil evento del sureste de salina cruz.

c. Evento 2: Oeste de Cihuatlán, Jalisco (M5.7)

- Fecha del evento: 10 de octubre de 2018
- Coordenadas epicentrales: 19.24° N, 104.61°
- Magnitud: Mw 5.7

Para este evento se encontró una gran anomalía en los datos obtenidos el día del evento en el eje Z, y este mismo efecto se encuentra uno y dos días antes del sismo, lo cual podría tratarse de eventos pre sísmicos, por eso se decidió trabajar con ellos en la estación UAS, obteniendo la Fig. 8 la cual muestra los datos crudos del eje Z.

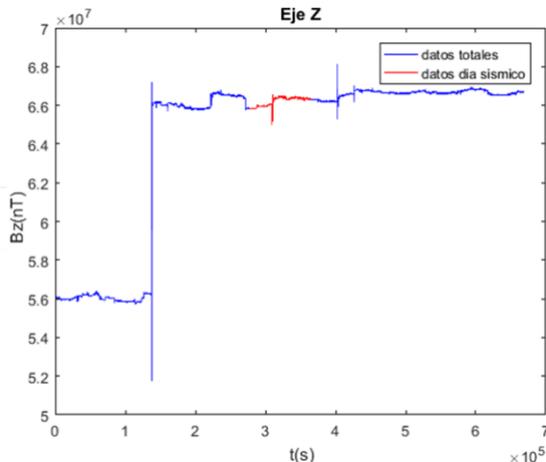


Fig. 8. Datos estación UAS. Eje Z evento sísmico de Cihuatlán, Jalisco.

En el caso de la estación estación Tucson, también se analizó el eje Z, para compárala con el resultado de la estación UAS, como se muestra en la Fig. 9 los datos crudos.

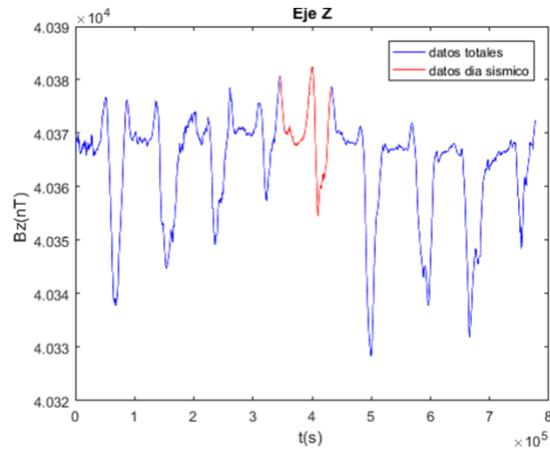


Fig. 9. Datos estación Tucson, eje Z evento sísmico de Cihuatlán, Jalisco.

De manera similar para este evento, pero en eje Z se aplicó tanto el filtro medio móvil como el DWT obteniendo la Fig. 10 para la estación UAS y la Fig. 11 para la estación Tucson.

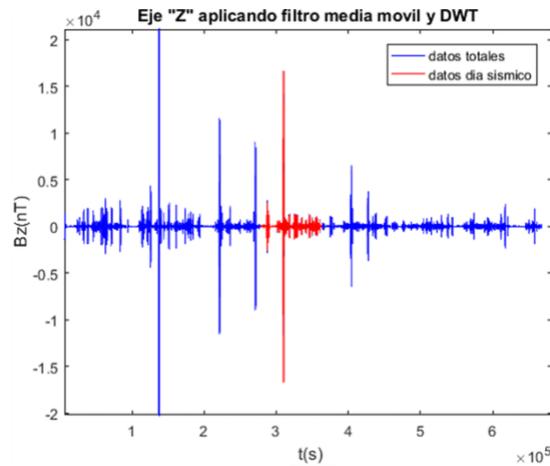


Fig. 10. Datos estación UAS. Eje Z filtro media móvil y DWT evento de Cihuatlán, Jalisco.

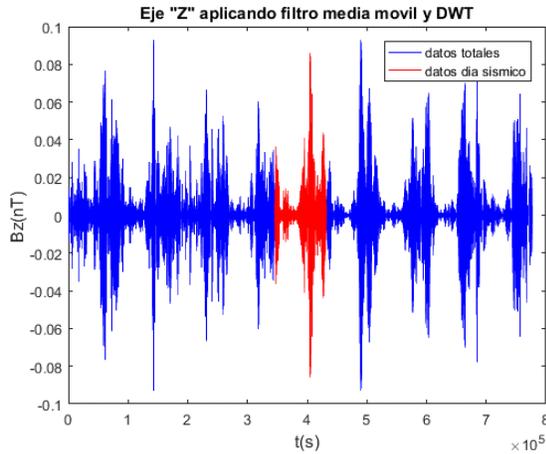


Fig. 11. Datos estación Tucson, Eje Z filtro media móvil y DWT evento de Cihuatlán, Jalisco.

Tras aplicar el procesamiento digital, se detectaron anomalías consistentes en tres momentos distintos, dos días antes, el día del sismo, y un día después como se señala en la Fig. 12. Para la estación UAS La presencia de un patrón repetido con características similares de amplitud y duración sugiere la existencia de precursor y evento post-sísmico.

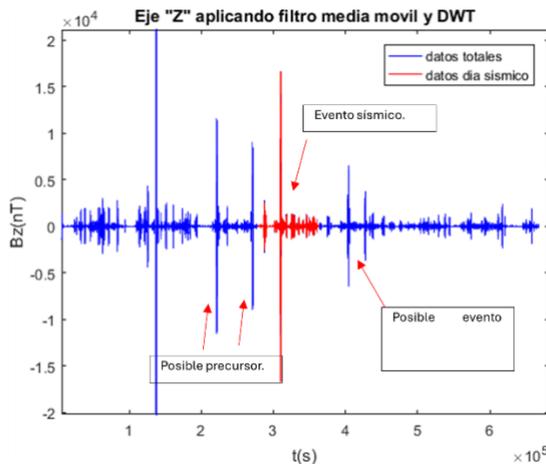


Fig. 12. Datos estación UAS. Eje z de media móvil y DWT evento de Cihuatlán, Jalisco mostrando posibles anomalías.

En el caso de la estación Tucson también se puede observar un comportamiento similar, en los posibles eventos, pero siendo menos claro el resultado como se muestra en la Fig. 13.

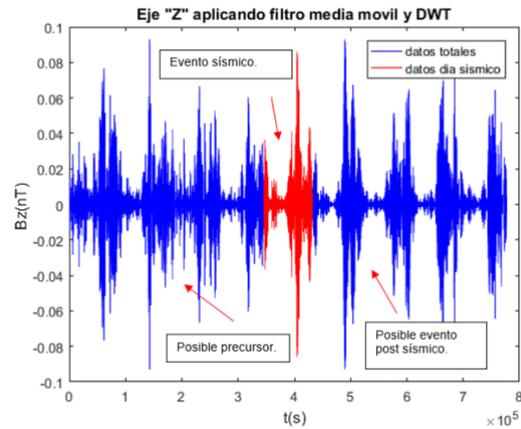


Fig. 13. Datos estación Tucson. Eje z de media móvil y DWT evento de Cihuatlán, Jalisco mostrando posibles anomalías.

El patrón observado especialmente en la Fig. 12 y menos claro, pero aún se puede resaltar en la Fig.13 reforzando lo propuesto por autores como J. P. Amezquita Sánchez et al. Quienes reportaron señales fractales y oscilatorias con comportamiento repetitivo como indicios de procesos geofísicos inminentes [14].

d. Evaluación Comparativa y Observaciones

En ambos eventos analizados:

- Se encontraron similitudes morfológicas en las anomalías detectadas por el sistema propio y la estación externa (Tucson), especialmente en los ejes donde se concentró la actividad magnética.
- Las anomalías pre-sísmicas aparecieron consistentemente entre 2 y 6 horas antes del evento principal, con amplitudes relativas entre 6–10 nT en los datos crudos.
- Las señales post-sísmicas también fueron visibles, repitiendo en algunos casos los patrones precusores con menor intensidad.

Estas observaciones sugieren que el sistema propuesto puede detectar patrones relevantes, aunque se requiere mayor volumen de datos y análisis estadísticos más robustos para confirmar su efectividad predictiva.

e. Recomendaciones Metodológicas Futuras

- Incorporar análisis de correlación cruzada o índice de similitud (como Pearson o Spearman) para comparar cuantitativamente las señales entre estaciones.
- Automatizar la detección de anomalías usando técnicas de inteligencia artificial o análisis no supervisado (como clustering o autoencoders).
- Aumentar el número de eventos analizados para evaluar sensibilidad y especificidad del sistema

ante distintas magnitudes y profundidades sísmicas.

En la Tabla 2, se puede apreciar, el resumen de los eventos y sus resultados, para ejemplificar mejor, los datos obtenidos.

Tabla 2. Resumen de eventos sísmicos analizados y resultados obtenidos.

Evento	Fecha	Magnitud	Eje principal	Tiempo antes del evento	Coincidencia con datos externos	Observaciones
Salina Cruz, Oaxaca	22/08/2018	6.8	X	2-6 h antes	Alta	Patrón similar al evento principal detectado con DWT
Cihuatlán, Jalisco	10/10/2018	5.7	Z	1-2 días antes y 1 día después	Modera	Evidencia de precursor y post-evento con comportamiento repetitivo

f. Discusión

4.6.1 Interpretación de anomalías pre-sísmicas

- Evento Salina Cruz (Mw 6.8): La detección de picos anómalos 2-6 h antes del sismo en el eje X coincide con rangos reportados por O. Chavez et al. Quienes documentaron anomalías ULF en ventanas de 1-12 h previas y posteriores al sismo [15].
- Evento Cihuatlán (Mw 5.7): Los patrones repetitivos en el eje Z, con eventos pre y post-sísmicos, son similares a los descritos también en el artículo de O. Chavez et al. Al aplicar DWT a los datos [15].

4.6.2 Comparación con sistemas previos

Frente a Three Day Mag (resolución ≈ 7 nT, muestreo 5 Hz) y PSWS (resolución 3 nT, 1 Hz), nuestro prototipo ofrece:

- Sensibilidad de 0.1 nT
- Resolución del ADC de 32 bits
- Bajo consumo energético, < 2 W, y aislado a ruido eléctrico.
- Dispositivo open Hardware/software, lo que permite ser replicado y escalado.

Estas mejoras técnicas permiten detectar anomalías de menor amplitud, operar en zonas sin energía estable y poder adaptarlo al estudio necesario.

4.6.3 Limitaciones del estudio

- Número de Eventos: Solo dos eventos con anomalías claras.
- Resolución Temporal: La frecuencia de muestreo de 1 Hz puede omitir transitorios < 1 s.

4.6.4 Implicaciones y líneas futuras

- Redes Distribuidas: La escalabilidad del sistema permite crear redes densas en regiones de alta sismicidad con bajo costo.
- IA y Machine Learning: Gracias al hardware que se tiene es posible Integrar algoritmos de detección automática mejorará la identificación de precursores en tiempo real.
- Comparación Multicéntrica: Evaluar con datos de estaciones cercanas reforzará la generalización de los hallazgos.
- Uso de diferentes sensores para evaluar su resultado y optimizar la relación costo desempeño.

5. Conclusiones

Este estudio demostró con éxito el desarrollo implementación y evaluación de un sistema embebido de bajo costo para el monitoreo geo-electromagnético orientado a la detección de precursores sísmicos. El sistema, basado en un magnetómetro fluxgate y una plataforma Raspberry Pi, operó de forma autónoma y registró datos que, tras ser procesados con filtros digitales y DWT, revelaron anomalías geomagnéticas previas a eventos sísmicos relevantes en México. La correspondencia de estas anomalías con registros de estaciones internacionales y patrones descritos en la literatura sugiere la viabilidad del sistema para identificar posibles precursores. En definitiva, este trabajo aporta una solución accesible y escalable que puede contribuir significativamente al desarrollo de redes de monitoreo

más amplias para la mitigación de riesgos sísmicos en regiones vulnerables

6. Referencias

- [1] J. Ballester *et al.*, “Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022,” *Nat Med*, vol. 29, no. 7, pp. 1857–1866, Jul. 2023, doi: 10.1038/s41591-023-02419-z.
- [2] C. G. Aksoy, M. Chupilkin, Z. Koczan, and A. Plekhanov, “Unearthing the impact of earthquakes: A review of economic and social consequences,” *Journal of Policy Analysis and Management*, Sep. 2024, doi: 10.1002/pam.22642.
- [3] S. Harrigan *et al.*, “Detection of Electromagnetic Seismic Precursors from Swarm Data by Enhanced Martingale Analytics,” *Sensors*, vol. 24, no. 11, Jun. 2024, doi: 10.3390/s24113654.
- [4] Y. Huang, P. Zhu, and S. Li, “Feasibility Study on Earthquake Prediction Based on Impending Geomagnetic Anomalies,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.3390/app14010263.
- [5] O. M. Saad *et al.*, “Earthquake Forecasting Using Big Data and Artificial Intelligence: A 30-Week Real-Time Case Study in China,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 113, May 2023, doi: 10.1785/0120230031.
- [6] F. Freund, “Pre-earthquake signals: Underlying physical processes,” *J Asian Earth Sci*, vol. 41, no. 4, pp. 383–400, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.03.009>.
- [7] I. P. Dobrovolsky, N. I. Gershenzon, and M. B. Gokhberg, “Theory of electrokinetic effects occurring at the final stage in the preparation of a tectonic earthquake,” *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 57, no. 1, pp. 144–156, 1989, doi: [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(89\)90224-0](https://doi.org/10.1016/0031-9201(89)90224-0).
- [8] E. H. Vestine, “Winds in the upper atmosphere deduced from the dynamo theory of geomagnetic disturbance,” *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, vol. 59, no. 1, pp. 93–128, 1954, doi: <https://doi.org/10.1029/JZ059i001p00093>.
- [9] D. Gordon and R. Brown, “Recent advances in fluxgate magnetometry,” *IEEE Trans Magn*, vol. 8, no. 1, pp. 76–82, 1972, doi: 10.1109/TMAG.1972.1067268.
- [10] M. J. S. Johnston and R. J. Mueller, “Seismomagnetic Observation During the 8 July 1986 Magnitude 5.9 North Palm Springs Earthquake,” *Science (1979)*, vol. 237, no. 4819, pp. 1201–1203, 1987, doi: 10.1126/science.237.4819.1201.
- [11] S. Uyeda, T. Nagao, and H. Tanaka, “A report from the RIKEN international frontier research project on earthquakes (IFREQ),” *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, vol. 15, pp. 269–310, Apr. 2004, doi: 10.3319/TAO.2004.15.3.269(EP).
- [12] A. Grinsted, J. Moore, and S. Jevrejeva, “Application of Cross Wavelet Transform and Wavelet Coherence to Geophysical Time Series,” *Nonlinear Process Geophys*, vol. 11, Apr. 2004, doi: 10.5194/npg-11-561-2004.
- [13] A. Baschiroto, E. Dallago, M. Ferri, P. Malcovati, A. Rossini, and G. Venchi, “A 2D micro-fluxgate earth magnetic field measurement systems with fully automated acquisition setup,” *Measurement*, vol. 43, no. 1, pp. 46–53, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2009.06.007>.
- [14] J. P. Amezcuita Sanchez, O. Chavez Alegria, M. Valtierra Rodriguez, J. A. L. Cruz Abeyro, J. R. Millan Almaraz, and A. Dominguez Gonzalez, “Detection of ULF Geomagnetic Anomalies Associated to Seismic Activity Using EMD Method and Fractal Dimension Theory,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 2, pp. 197–205, Feb. 2017, doi: 10.1109/TLA.2017.7854612.
- [15] O. Chavez, J. R. Millan-Almaraz, J. Rodríguez-Reséndiz, J. P. Amezcuita-Sanchez, M. Valtierra-Rodriguez, and J. A. L. Cruz-Abeyro, “DWT-based methodology for detection of seismic precursors on electric field signals in Mexico,” *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 9, no. 1, pp. 281–294, 2018, doi: 10.1080/19475705.2018.1428229.
- [16] M. Tsutsui, “Behaviors of Electromagnetic Waves Directly Excited by Earthquakes,” *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, vol. 11, pp. 1961–1965, Apr. 2014, doi: 10.1109/LGRS.2014.2315208.
- [17] F. Dudkin, V. Korepanov, D. Dudkin, V. Pilipenko, V. Pronenko, and S. Klimov, “Electric field of the power terrestrial sources observed by microsatellite Chibis-M in the Earth’s ionosphere in frequency range 1–60 Hz,” *Geophys Res Lett*, vol. 42, pp. 5686–5693, Apr. 2015, doi: 10.1002/2015GL064595.
- [18] A. Vajuravel, E. Khoshaba, F. Andrade, T. Garcia, and P. J. Chi, “A Low-cost SMART System for Real-Time Geomagnetic Field Monitoring,” in *AGU Fall Meeting Abstracts*, Dec. 2023, pp. GP01-04.
- [19] H. Kim *et al.*, “Citizen science: Development of a low-cost magnetometer system for a coordinated space weather

monitoring,” *HardwareX*, vol. 20, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.ohx.2024.e00580.

[20] B. M. De Groot and L. V. De Groot, “A low-cost device for measuring local magnetic anomalies in volcanic terrain,” *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 217–225, Aug. 2019, doi: 10.5194/gi-8-217-2019.

[21] S. Uyeda, T. Nagao, and M. Kamogawa, “Short-term earthquake prediction: Current state of seismo-electromagnetics,” *Tectonophysics*, vol. 470, pp. 205–213, May 2010, doi: 10.1016/j.tecto.2008.07.019.

Investigación y diseño de software basado en la teoría de matroides orientadas

Designing software based on oriented matroid Theory.

Emmanuel Roberto Estrada Aguayo¹, Carlos Francisco Montoya Urzúa²

¹Facultad de Informática / Universidad Autónoma de Sinaloa, México.

²Departamento de Sistemas y Computación, Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán, México.

Recibido: Enero 2025, **Aceptado:** Marzo 2025, **Publicado:** Mayo 2025

Resumen:

Este trabajo presenta el diseño de un software en C++ orientado al análisis de matroides orientadas, estructura fundamental de la geometría combinatoria que extiende el concepto de independencia lineal. Se abordan nociones clave de la teoría; como base, circuito, matroide uniforme y chirotope (χ), que describe la orientación de la matroide. El desarrollo se basa en una fórmula propuesta por el Dr. J. A. Nieto para construir una matriz que represente a una matroide orientada a partir de n elementos y su correspondiente chirotope. La implementación computacional genera matrices cuadradas $n \times n$, pero el análisis muestra que, en general, estas no satisfacen las condiciones necesarias de dependencia lineal esperadas en matroides de rango $r < n$, pues presentan determinantes distintos de cero, lo cual contradice su validez como representaciones sobre \mathbb{R} . Como resultado emergente, se propone que la submatriz conformada por las primeras r filas de la matriz generada podría ser una representación válida de la matroide, hipótesis apoyada por ejemplos computacionales. Se concluye que el software constituye un avance funcional en el estudio computacional de matroides orientadas, y se identifican líneas futuras para validar formalmente la fórmula base, optimizar su complejidad algorítmica y caracterizar la representabilidad computacional de este tipo de estructuras.

Palabras Clave: matroide, matriz, chirotope, software.

Abstract:

This work presents the design of C++ software aimed at the analysis of oriented matroids, a fundamental structure in combinatorial geometry that extends the concept of linear independence. Key notions of the theory are addressed, such as bases, circuits, uniform matroids, and the chirotope (χ), which describes the orientation of the matroid. The development is based on a formula proposed by Dr. J. A. Nieto to construct a matrix representing an oriented matroid from n elements and its corresponding chirotope. This computational implementation generates square matrices of size $n \times n$, but analysis shows that, in general, these do not satisfy the necessary conditions of linear dependence expected in matroids of rank $r < n$, as they yield nonzero determinants, contradicting their validity as representations over \mathbb{R} . As an emergent result, it is proposed that the submatrix formed by the first r rows of the generated matrix may constitute a valid representation of the matroid, a hypothesis supported by computational examples. It is concluded that the software represents a functional advance in the computational study of oriented matroids, and future lines of research are identified to formally validate the base formula, optimize its algorithmic complexity, and characterize the computational representability of such structures.

Index Terms: matroid, matrix, chirotope, software.

1. Introducción

La Teoría de Matroides es una rama de la geometría combinatoria que se basa en la estructura conocida como matroide, que ofrece una generalización del concepto de independencia lineal entre vectores. Por tal motivo, esta encuentra su valor matemático dentro del álgebra lineal, pero también dentro de la teoría de grafos; donde permite estudiar los conjuntos de caminos acíclicos (bosques) y cíclicos de un grafo.

Dentro de las Ciencias de la Computación, los matroides han sido utilizados para generar algoritmos de solución a varios problemas de optimización; y en el caso de los matroides orientados, han destacado por su aplicación dentro del campo de la geometría computacional [2].

La generación de representaciones matriciales de matroides orientadas constituye un problema relevante tanto desde el punto de vista teórico como computacional.

Las matroides orientadas incorporan a la teoría de matroides axiomas relacionados con la orientación de conjuntos de vectores. Estas ofrecen un marco potente para modelar estructuras en geometría combinatoria, optimización y teoría de arreglos.

A pesar de su riqueza conceptual, el tratamiento computacional de estas estructuras es aún escaso. Existen muy pocas herramientas de software que permitan construir explícitamente matrices que representen una matroide dada, y son aún menos aquellas que operan sobre matroides orientadas.

Esta escasez limita el acceso a experimentación computacional, simulación de ejemplos complejos y verificación empírica de conjeturas, lo cual es crucial tanto en contextos educativos como en la investigación avanzada.

Por tal motivo, el presente trabajo tiene como objetivo principal el diseño de software que permita calcular la matriz representación de una matroide orientada, a partir de datos que caractericen la matroide seleccionada por el usuario; tales como rango, dimensión y el mapeo de la función chirotope.

Fundamentándose en este objetivo general, se establecen los siguientes objetivos específicos aplicables al proyecto son:

1. Desarrollar un prototipo funcional en C++ capaz de generar representaciones matriciales de matroides orientadas a partir de un chirotope dado.
2. Validar computacionalmente la consistencia de las matrices generadas, mediante la comparación con propiedades teóricas esperadas de matroides de bajo rango.

3. Analizar las limitaciones de la fórmula implementada y proponer hipótesis para su corrección o mejora, sustentadas en los resultados experimentales obtenidos.
4. Evaluar el potencial educativo y de investigación del software desarrollado mediante ejemplos aplicados en el contexto de la teoría de matroides orientadas.

Se espera que este proyecto sea de gran utilidad para el estudio de la teoría de matroides y su aplicación en otros campos.

En años recientes, la teoría de matroides ha encontrado nuevas aplicaciones dentro de la cosmología, el análisis y la edición genética, y el desarrollo de la Inteligencia Artificial [6]. Por tanto, software que ayude a entender los conceptos básicos de la teoría de matroides, será altamente beneficioso para estudiantes y profesionistas de estas ramas del conocimiento.

La mayoría de los algoritmos sobre matroides suelen ser computacionalmente costosos (Big-O grande), al basarse principalmente en realizar operaciones durante varios recorridos sobre una misma matriz. Por tal motivo el presente software fue codificado en C++, que es un lenguaje que puede parecer limitado al usarse en investigaciones científicas, pero es reconocido por su velocidad y menor consumo de recursos comparado a los lenguajes de programación de alto nivel. Además, C++ es uno de los lenguajes de programación que más facilita la creación de librerías externas para usar sus funciones en software escrito en un lenguaje distinto (como Java o Python).

Por último, se reconoce que la idea original de este código fue creada por el Licenciado en Física Daniel Aldana Virgen. Sobre la base de su trabajo, el sistema fue actualizado, optimizado, y en algunos aspectos corregido, para alcanzar un uso más general y mayor amabilidad con el usuario.

2. Trabajos Relacionados

2.1 Antecedentes de proyectos de software relacionados a la teoría de matroides.

En décadas recientes se han generado un puñado de herramientas de software orientadas para el estudio de matroides, aunque pocas se enfocan específicamente en matroides orientadas.

Se procede a enumerar las herramientas de software relacionadas más destacadas:

- **Polymake**, una plataforma extensible desarrollada en C++ y Perl; está orientada principalmente a la

geometría de poliedros. Esta ofrece un módulo para el análisis estructural de matroides que permite calcular bases, circuitos y polinomios de Tutte; pero no contempla representaciones orientadas a partir de chirotope [9].

- **Oid** es un sistema que ofrece una interfaz interactiva para experimentar con matroides, aunque su enfoque se restringe a representaciones sobre campos finitos. Actualmente no ofrece ninguna aproximación a matroides orientadas [10].
- **SageMath**, un sistema de álgebra computacional basado en Python cuenta con una sólida implementación de matroides, permitiendo su construcción y análisis desde matrices o funciones de rango. Sin embargo, su soporte para matroides orientadas es limitado, y no ofrece una funcionalidad específica para derivar representaciones matriciales de una matroide [11].
- **Maple** es un sistema de algebra computacional ampliamente usado. En su versión del año 2024, ha incorporado módulos dedicados al estudio de matroides, pero mantiene un enfoque general y no aborda aspectos orientados [12].

Finalmente, existen propuestas orientadas a aplicaciones específicas, como la planificación de caminos en robótica, que emplean matroides orientadas en su modelado, pero sin ofrecer herramientas reutilizables [13].

Estos antecedentes reflejan que, aunque existen ya diversas herramientas para el estudio de matroides, se identifica una carencia de software específico que facilite el análisis de matroides orientadas, especialmente en lo que respecta a su representación matricial y la validación de propiedades asociadas.

El desarrollo de herramientas especializadas en este ámbito podría llenar este vacío y proporcionar un recurso valioso para investigadores y educadores interesados en la teoría de matroides orientadas.

Una vez abordado el conocimiento de las herramientas de software que anteceden al presente proyecto, se presentan los conceptos básicos de la teoría de matroides presentados en [1],[2], y [3]. Sobre estos conceptos se sustenta la investigación.

2.2 Matroide

Una matroide es una estructura de la geometría combinatoria que extiende el concepto de independencia lineal. Su definición técnica es la siguiente:

Definición 1. [2] Una matroide M es un par (E, \mathcal{B}) , donde E es un conjunto finito no vacío y \mathcal{B} es una colección no vacía de subconjuntos de E (llamados bases) que satisfacen las siguientes propiedades:

- $\emptyset \in \mathcal{B}$
- Ninguna base contiene propiamente a otra base;
- Si B_1 y B_2 son bases y si b es cualquier elemento de B_1 , entonces existe un elemento g de B_2 con la propiedad de que $(B_1 - \{b\}) \cup \{g\}$ también es una base.

El conjunto E se nombra conjunto soporte de la matroide.

El conjunto \mathcal{B} se nombra conjunto hereditario.

Todo conjunto que sea elemento de \mathcal{B} , y cualquier subconjunto de algún conjunto elemento de \mathcal{B} , se denomina conjunto linealmente independiente.

2.3 Circuitos de una matroide

Definición 2. [1][2] Un circuito de una matroide es un conjunto linealmente dependiente con la cardinalidad mínima posible.

El conjunto de circuitos de una matroide suele denotarse como \mathcal{C} , y posee las siguientes propiedades:

1. $\emptyset \notin \mathcal{C}$. El vacío es considerado un conjunto linealmente independiente, por tanto, no es un circuito.
2. Ningún circuito de una matroide contiene a otro circuito. Por tanto, si $C_1, C_2 \in \mathcal{C}$, y $C_1 \subseteq C_2$, entonces $C_1 = C_2$.
3. Si $C_1 \in \mathcal{C}$, entonces $C_1 \notin \mathcal{B}$ y $(C_1 - x) \subseteq b$, $b \in \mathcal{B}$ para todo $x \in C_1$. O sea que un circuito nunca es una base de la matroide, pero al quitarle cualquier elemento al circuito, este es un conjunto linealmente independiente (una base o un subconjunto de una base).
4. Si $C_1, C_2 \in \mathcal{C}$, $C_1 \neq C_2$ y $e \in C_1 \cap C_2$, entonces existe un $C_3 \in \mathcal{C}$ tal que $C_3 \subseteq (C_1 \cap C_2) - e$.

2.4 Matroide Uniforme $U_{k,n}$

Definición 3. [1][2][3] Una matroide uniforme (denotada como $U_{k,n}$) con $k < n$, es una matroide sobre un conjunto soporte E de n elementos, donde cualquier subconjunto de E con k elementos distintos es una base de la matroide (k es el rango de la matroide).

$$U_{k,n} = (E, \mathcal{B}) \quad (1)$$

$$E = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

$$\text{Sea } b \subseteq E, \text{ entonces } |b| = k \Leftrightarrow b \in \mathcal{B} \quad (3)$$

Por ejemplo, la matroide $U_{2,4}$ es conformada por los siguientes conjuntos:

$$U_{2,4} = (E, \mathcal{B}) \quad (4)$$

$$E = \{1, 2, 3, 4\} \quad (5)$$

$$\mathcal{B} = \{\{1, 2\}, \{1, 3\}, \{1, 4\}, \{2, 3\}, \{2, 4\}, \{3, 4\}\} \quad (6)$$

2.5 Matroide Orientada

Definición 4. [1][3] Una matroide orientada M es un tipo de matroide definida por un par $M = (E, \chi)$, donde E es el conjunto soporte de la matroide (un conjunto finito de elementos); y χ (denominado *chirotope*, *chirotopo*, *chirotopo* o *tipo de orden*) es una función que hace un mapeo sobre las permutaciones de cada k -tupla de elementos pertenecientes a E , al conjunto $\{-1, 0, 1\}$, muchas veces expresado como $\{-, 0, +\}$, que satisface la definición siguiente.

2.5.1 Chirotope

Un chirotope (también denominado en español como *chirotopo* o *chirotopo*) es una estructura algebraica asociada con la teoría de matroides orientados. Proporciona una manera de describir la orientación de los elementos en una matroide, lo que permite extender varias propiedades y resultados de la teoría de matroides a una versión orientada. El concepto de chirotope se originó en la teoría de matroides y geometría combinatoria.

Definición 5. [3] Dado un conjunto finito E de n elementos, un chirotope es una función n que asigna a cada k -tupla ordenada de elementos de E un valor de $\{+1, -1, 0\}$, de manera que se cumplen ciertas propiedades que reflejan la orientación de los elementos. Para matroides completos, se asume que $k = n$.

Formalmente, un chirotope de rango k sobre un conjunto finito E es una función

$$\chi: E^k \rightarrow \{+, -, 0\} \quad (7)$$

que satisface las siguientes propiedades:

1. **Toma una tupla de tantos elementos de E como el rango de la matroide.**

2. **No es constante 0.** Dicho valor aparece exclusivamente cuando la tupla de elementos NO es una base de la matroide a la que describe.

3. **Antisimetría o alternancia:** Para cualquier permutación σ de $\{1, 2, \dots, k\}$,

$$\chi(e_{\sigma(1)}, e_{\sigma(2)}, \dots, e_{\sigma(k)}) = \text{sign}(\sigma) \cdot \chi(e_1, e_2, \dots, e_k) \quad (8)$$

donde $\text{sign}(\sigma)$ es la signatura de la permutación σ . Esto es similar al signo del determinante de una matriz, que alterna entre las distintas formas de ordenar los vectores que conforman dicha matriz.

4. **Propiedad de Graßman-Plücker (o propiedad de intercambio):** Para cualquier conjunto de $k + 1$, elementos e_1, e_2, \dots, e_{k+1} en E , se cumple

$$\sum_{i=1}^{k+1} (-1)^i \chi(e_1, \dots, \hat{e}_i, \dots, e_{k+1}) \chi(e_i, f_1, \dots, f_{k-1}) = 0 \quad (9)$$

donde \hat{e}_i denota que el elemento e_i se omite.

2.6 Representación matricial de una matroide

Definición 6. [1][2] La **representación matricial de una matroide** es una forma de representar la matroide mediante una matriz donde cada columna de esta está asociada a un elemento del conjunto soporte de la matroide E . Así pues, la columna 1 representa al elemento 1 del conjunto E de la matroide, la columna 2 representa al elemento 2 y así sucesivamente.

Esta matriz codifica la información sobre las dependencias lineales y las relaciones entre los subconjuntos del conjunto E . Para todo subconjunto e del conjunto soporte E , si sus elementos son linealmente independientes, entonces los vectores columna de la matriz asociados a los elementos de e también son linealmente independientes. Si los elementos de e son linealmente dependientes, también lo es el conjunto de vectores columna asociados a sus elementos.

Cabe aclarar que las representaciones matriciales de una matroide dada son específicas a un determinado campo de Galois. Ya que dos vectores pueden ser linealmente independientes en un campo de Galois específico, y no serlo en otros.

Por norma general, si un elemento de E no es parte de ninguna base de la matroide dada, este se representa con el vector nulo o $\vec{0}$.

No todas las matroides pueden asociarse a una matriz. Aquellas que si tienen una matriz que las caracteriza son nombradas matroides representables [1][2][14].

3. Metodología.

Este estudio se desarrolló bajo un enfoque cualitativo con un diseño metodológico de tipo *investigación-acción tecnológica*, orientado a proponer y evaluar una herramienta computacional que facilite el análisis estructural de matroides orientadas, al tiempo que se reflexiona críticamente sobre sus fundamentos teóricos. Este enfoque es adecuado para investigaciones donde el desarrollo de soluciones tecnológicas se vincula estrechamente con el avance del conocimiento disciplinar.

Se emplearon tres técnicas principales: análisis documental, observación sistemática y pruebas computacionales controladas. El análisis documental consistió en la revisión de literatura especializada sobre matroides y matroides orientadas, con énfasis en su representación mediante matrices y las propiedades algebraicas asociadas. La observación sistemática se llevó a cabo durante el proceso iterativo de desarrollo del software, registrando comportamientos relevantes, limitaciones técnicas y respuestas del sistema. Las pruebas computacionales permitieron aplicar el algoritmo a distintos ejemplos para contrastar su funcionamiento con resultados teóricos conocidos.

La muestra del estudio estuvo conformada por una colección de instancias de matroides orientadas, principalmente de bajo y mediano rango ($r \leq 4$), extraídas de fuentes académicas o generadas *ad hoc*, que sirvieron como casos de prueba para evaluar la validez de las representaciones obtenidas.

El instrumento principal fue un prototipo de software desarrollado en C++ durante la investigación, complementado con una bitácora de ejecución que permitió documentar sistemáticamente los resultados obtenidos, anomalías encontradas y ajustes realizados. Como se mencionó en la introducción, la elección de C++ se basó en su eficiencia en la ejecución de algoritmos intensivos en operaciones matriciales.

Para asegurar la validez del estudio, se aplicó triangulación metodológica: los resultados computacionales se contrastaron con teorías existentes, y se sometieron a revisión por parte de especialistas en matemáticas aplicadas y computación. Esta triangulación permitió fortalecer la confiabilidad de los hallazgos y

establecer fundamentos sólidos para futuras mejoras del sistema.

En los apartados subsecuentes se incluyen aspectos teóricos relevantes para el desarrollo del sistema de software que fueron encontrados por medio de la investigación bibliográfica o por medio del análisis de los resultados guardados en la bitácora de pruebas.

3.1 Cálculo de la representación matricial de una matroide orientada

Antes de iniciar esta sección, cabe recalcar que en [1] se aclara que no todas las matroides son representables por una matriz sobre un determinado campo \mathbb{F} .

La fórmula propuesta en [3] para el cálculo de una matriz cuadrada $A = \{a_{i,j}\}$, que funcione de representación a una matroide orientada es (en notación tensorial):

$$a_{i,j} = \chi_{ikl} \chi_{jkl} \quad (10)$$

Se puede generalizar por la siguiente fórmula para una matroide orientada M , con un chirotope χ que tome r elementos del conjunto soporte de la matroide E , es que toma en cuenta todas las permutaciones con repetición de r elementos de E :

$$a_{i,j} = \frac{1}{MCD\{A\}} \sum_{x_1=1}^n \sum_{x_2=1}^n \sum_{x_3=1}^n \dots \sum_{x_{r-1}=1}^n \chi(i, x_1, x_2, x_3, \dots, x_{r-1}) * \chi(j, x_1, x_2, x_3, \dots, x_{r-1}) \quad (11)$$

Sobre la fórmula anterior se sustenta la programación del software.

Apréciase que se usan $r - 1$ sumatorias e índices, ya que el primer índice en la función chirotope siempre corresponderá, primero a la fila del elemento en la matriz y segundo a su columna.

Por ejemplo, el cálculo de la matriz $a_{i,j}$ para una matroide $U_{4,n}$, con un chirotope $\chi: E^4 \rightarrow \{-1,0,1\}$, quedará a como:

$$a_{i,j} = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{m=1}^n \chi(i, k, l, m) * \chi(j, k, l, m) \quad (12)$$

Esta última fórmula puede escribirse para revisar únicamente las permutaciones diferentes de cero:

$$a_{i,j} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i \\ k \neq j}}^n \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i \\ l \neq j}}^n \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i \\ m \neq j \\ m \neq k}}^n \chi(i, k, l, m) * \chi(j, k, l, m) \quad (13)$$

3.2 Propiedades particulares de la matriz A en una matroide orientada

3.2.1 En una matroide orientada $U_{r,n}$, la diagonal principal $a_{i,i}$ tiene el mismo valor en todos sus elementos, y este valor es:

$$a_{i,i} = \frac{(n-1)!}{(n-r)!} \quad (14)$$

Prueba. Tomando la fórmula de los sumatorios, es fácil ver que el producto de chirotopes sólo tiene dos valores posibles, 1 y 0 ; cuando $i = j$:

$$\begin{aligned} & \chi(i, x_1, x_2, x_3, \dots, x_{r-1}) * \chi(j, x_1, x_2, x_3, \dots, x_{r-1}) \\ &= \chi(i, x_1, x_2, x_3, \dots, x_{r-1}) * \chi(i, x_1, x_2, x_3, \dots, x_{r-1}) \\ &= \chi(i, x_1, x_2, x_3, \dots, x_{r-1})^2 \\ &= \{(-1)^2, 0, 1^2\} \\ &= \{1, 0\} \end{aligned} \quad (15)$$

Por consecuencia directa de la definición de matroide uniforme, el valor 0 aparecerá exclusivamente y siempre cuando la permutación de r elementos que tomará χ incluye repeticiones. Por tanto, el número de casos donde χ no es 0, es: $\frac{n!}{(n-r)!}$. Sin embargo, al ser el primer elemento (i) fijo, las permutaciones se reducen a $\frac{(n-1)!}{(n-1-(r-1))!} = \frac{(n-1)!}{(n-r)!}$; para todo valor de i , y por consecuencia, este es el valor de todo elemento de la diagonal principal.

3.2.2 La matriz A es siempre una matriz simétrica.

Prueba. Partiendo de que la matriz simétrica posee la particularidad: $a_{i,j} = a_{j,i}$, se procede a hacer el cálculo de ambos elementos. Es fácil comprobar que el producto de los chirotopes χ siempre dará el mismo valor para toda permutación de elementos de E , al ser sólo un cambio de orden en los factores.

3.3 Técnica empleada para almacenar el mapeo del chirotope en el programa

$$a_{i,j} = \sum_{x_1=1}^n \sum_{x_2=1}^n \sum_{x_3=1}^n \dots \sum_{x_{r-1}=1}^n \chi(\mathbf{i}, x_1, x_2, x_3, \dots, x_{r-1}) * \chi(\mathbf{j}, x_1, x_2, x_3, \dots, x_{r-1}) \quad (16)$$

$$a_{j,i} = \sum_{x_1=1}^n \sum_{x_2=1}^n \sum_{x_3=1}^n \dots \sum_{x_{r-1}=1}^n \chi(\mathbf{j}, x_1, x_2, x_3, \dots, x_{r-1}) * \chi(\mathbf{i}, x_1, x_2, x_3, \dots, x_{r-1}) \quad (17)$$

La necesidad de almacenar el mapeo del chirotope durante la ejecución del programa supuso un reto mayor al previsto. Para esto, se almacenaron los signos del mapeo del chirotope dentro de un arreglo. Cualquier subconjunto de k elementos del conjunto soporte E tiene una entrada en el mapeo del chirotope, y el signo de esa entrada es almacenado en el arreglo. Cada tupla de k elementos (ordenados ascendentemente) pasa como un vector \vec{a} a la función $f(\vec{a})$ (que será descrita más adelante), el valor devuelto por esta función es la posición del arreglo donde se almacena el signo correspondiente a la tupla. Está técnica para almacenar registros de forma ordenadas se conoce como hashing, y la función $f(\vec{a})$ se denominará como FUNCIÓN HASH DE COMBINACIONES.

Definición 7. Función Hash de combinaciones. Sea \vec{a} un vector de dimensión k (índices de 1 a k), compuesto por el conjunto $A = \{a \mid a \text{ es un número entero entre } 1 \text{ y } n\}$, donde los componentes de \vec{a} se encuentran ordenados ascendentemente y sin repetición.

Sea $f(\vec{a})$ una función sobre el conjunto de posibles valores que tome el vector \vec{a} : $f: A^k \rightarrow [0, \frac{n!}{k!(n-k)!} - 1]$

Es simple inferir que existen $\binom{n}{k}$ formas distintas de elegir el vector \vec{a} . Para asignarle un número de 0 a $\binom{n}{k} - 1$ a cada uno de estos posibles vectores \vec{a} , se puede emplear la siguiente función:

$$f(\vec{a}) = \sum_{i=1}^k \sum_{\substack{j=1+a_{i-1} \\ \text{Si } i \rightarrow j=1}}^{a_i} \binom{n-j}{k-i} \quad (18)$$

Si como en el lenguaje C, los índices de un vector inician en 0 y no en 1, la fórmula pasa a:

$$f(\vec{a}) = \sum_{i=0}^{k-1} \sum_{\substack{j=1+a_{i-1} \\ \text{si } i=0 \rightarrow j=1}}^{a_i} \binom{n-j}{k-i-1} \quad (19)$$

Esta fórmula es implementada por la función combinatorialHash mostrada a continuación. Cabe aclarar que la función combinatorial (n, k) es una implementación del coeficiente de Newton para obtener del total de combinaciones de k elementos de un total de n.

3.3.1 implementación de la función combinatorialHash en el lenguaje C++

```
int combinatorialHash (int a [], int k, int n) {
    int hash = 0;
    int j = 0;

    for (int i = 0; i < k; i++) {
        if (i > 0) j = a[i-1] + 1;
        else j = 1;

        for (; j < a[i]; j++) {
            hash += combinatorial (n - j, k - 1 - i);
        }
    }

    return hash;
}
```

La demostración de que esta fórmula es unívoca (con correspondencia uno-a-uno) y que tiene el rango especificado son pormenores que escapan al tema central del trabajo; además de ser sumamente extensos. Por tanto, no serán expuestos en el presente escrito.

3.4 Código fuente de los programas desarrollados durante la investigación

3.4.1 Matroide Uniforme $U_{2,4}$

```
//LIBRARY HEADERS
#include <iostream>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <iomanip>

using namespace std;

//PROTOTYPES
int chirotope (int,int);

int main(){
    system("cls");

    //DECLARATION VARIABLES
    int k = 0;
    int suma = 0;
    int maxVal = 4;
    double g[4][4];
```

```
int chi1 = 0, chi2 = 0;

cout<<"MATRIZ PARA LA MATROIDE U_2,4\n\n";

//COMPUTING SMALL MATROID
for (int i = 0; i < 4; ++i) {
    for (int j = 0; j < 4; ++j) {
        suma = 0;
        k = 1;
        cout<<"\nOPERACIONES PARA g"<<i + 1<<","<<j +
1<<"\n";
        while (k < 5) {
            if(k != (i + 1) && k != (j + 1)) {
                chi1 = chirotope (i + 1, k);
                chi2 = chirotope (j + 1, k);
                cout<<"chi ("<<i + 1 <<","<<k<<") * chi ("<<j +
1<<","<<k<<") = "
                <<chi1<<" * "<<chi2<<" = "<<(chi1 * chi2)<<
"\n";
                suma += chi1 * chi2;
            }
            k++;
        }
        g[i][j] = suma;
    }
}
//PRINTING MATRIX
cout << "\n\n\n";
for (int i = 0; i < 4; ++i) {
    for (int j = 0; j < 4; ++j) {
        cout<< setw(6)<< g[j][i]<<" ";
    }
    cout << "\n";
}

//RETURN ASSOCIATED VALUE TO 2 ELEMENTS
int chirotope (int x0, int x1) {
    int x[] = {x0, x1};
    int signo = 0;
    int aux = 0;
    int inversiones = 0;

    if (x0 == x1) return 0;

    for (int i = 0; i < 3; ++i) {
        for (int j = i + 1; j < 4; ++j) {
            if (x[i] > x[j]) {
                ++inversiones;
                aux = x[i];
                x[i] = x[j];
                x[j] = aux;
            }
        }
    }
    signo = 1;
    if(x[0] == 1 && x[1] == 4){
        signo = -1;
    }
    else if(x[0] == 2 && x[1] == 3){
        signo = -1;
    }
    else if(x[0] == 2 && x[1] == 4){
        signo = -1;
    }
}
```

```

} else if(x[0] == 3 && x[1] == 4){
    signo = -1;
}
return signo * pow(-1, inversiones);
}

```

3.4.2 Matroide Uniforme $U_{4,8}$

```

//LIBRARY HEADERS
#include <iostream>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <iomanip>

using namespace std;

//PROTOTYPES
int chirotope (int,int,int,int);

int main(){
    system("cls");
    //DECLARING VARIABLES
    int k = 0;
    int l = 0;
    int m = 0;
    int suma = 0;
    int maxVal = 8;
    int g[8][8];
    //int chi1 = 0, chi2 = 0;

    cout<<"MATRIZ PARA LA MATROIDE U_4,8\n\n";
    //COMPUTING SMALL MATROID
    for (int i = 0; i < maxVal; ++i) {
        for (int j = 0; j < maxVal; ++j) {
            k = 1;
            l = 1;
            m = 1;
            suma = 0;

            while (k <= maxVal) {
                suma += chirotope (i + 1,k,l,m) * chirotope (j + 1,k,l,
m);
                ++m;
                if (m == maxVal + 1) {
                    m = 1;
                    ++l;
                } //if-m

                if (l == maxVal + 1) {
                    l = 1;
                    ++k;
                } //if-l
            } //while-k

            g[i][j] = suma/24;
            cout<< setw(6)<< g[i][j]<< " ";
        } //for-j
        cout << "\n";
    } //for-i

    getch();
    return 0;
}

```

```

//RETURN ASSOCIATED VALUE TO 4 ELEMENTS
int chirotope (int x0, int x1, int x2, int x3) {
    int x[] = {x0, x1, x2, x3};
    int signo = 0;
    int aux;
    int inversiones = 0;

    for (int i = 0; i < 3; ++i) {
        for (int j = i + 1; j < 4; ++j) {
            if (x[i] > x[j]) {
                ++inversiones;
                aux = x[i];
                x[i] = x[j];
                x[j] = aux;
            } else if (i != j && x[i] == x[j]) {
                return 0;
            }
        } //for-j
    } //for-i

    signo = 1;

    if(x[0] == 1 && x[1] == 2 && x[2] == 4 && x[3] == 7){
        signo = -1;
    } else if(x[0] == 1 && x[1] == 2 && x[2] == 5 && x[3] == 7)
    ){
        signo = -1;
    } else if(x[0] == 1 && x[1] == 2 && x[2] == 5 && x[3] == 8)
    ){
        signo = -1;
    } else if(x[0] == 1 && x[1] == 2 && x[2] == 6 && x[3] == 7)
    ){
        signo = -1;
    } else if(x[0] == 1 && x[1] == 2 && x[2] == 6 && x[3] == 8)
    ){
        signo = -1;
    } else if(x[0] == 1 && x[1] == 3 && x[2] == 4 && x[3] == 5)
    ){
        signo = -1;
    } else if(x[0] == 1 && x[1] == 3 && x[2] == 4 && x[3] == 7)
    ){
        signo = -1;
    } else if(x[0] == 1 && x[1] == 3 && x[2] == 6 && x[3] == 7)
    ){
        signo = -1;
    } else if(x[0] == 1 && x[1] == 3 && x[2] == 6 && x[3] == 8)
    ){
        signo = -1;
    } else if(x[0] == 1 && x[1] == 3 && x[2] == 6 && x[3] == 8)
    ){
        signo = -1;
    } else if(x[0] == 1 && x[1] == 4 && x[2] == 5 && x[3] == 7)
    ){
        signo = -1;
    } else if(x[0] == 1 && x[1] == 4 && x[2] == 5 && x[3] == 8)
    ){
        signo = -1;
    } else if(x[0] == 1 && x[1] == 4 && x[2] == 6 && x[3] == 8)
    ){
        signo = -1;
    } else if(x[0] == 1 && x[1] == 4 && x[2] == 6 && x[3] == 8)
    ){
        signo = -1;
    } else if(x[0] == 1 && x[1] == 5 && x[2] == 7 && x[3] == 8)
    ){
        signo = -1;
    } else if(x[0] == 2 && x[1] == 3 && x[2] == 4 && x[3] == 5)
    ){
        signo = -1;
    } else if(x[0] == 2 && x[1] == 3 && x[2] == 4 && x[3] == 6)
    ){

```

```

){
    signo = -1;
} else if(x[0] == 2 && x[1] == 3 && x[2] == 4 && x[3] == 7
){
    signo = -1;
} else if(x[0] == 2 && x[1] == 3 && x[2] == 4 && x[3] == 8
){
    signo = -1;
} else if(x[0] == 2 && x[1] == 3 && x[2] == 6 && x[3] == 7
){
    signo = -1;
} else if(x[0] == 2 && x[1] == 4 && x[2] == 6 && x[3] == 7
){
    signo = -1;
} else if(x[0] == 2 && x[1] == 5 && x[2] == 7 && x[3] == 8
){
    signo = -1;
} else if(x[0] == 2 && x[1] == 6 && x[2] == 7 && x[3] == 8
){
    signo = -1;
} else if(x[0] == 3 && x[1] == 4 && x[2] == 5 && x[3] == 7
){
    signo = -1;
} else if(x[0] == 3 && x[1] == 4 && x[2] == 5 && x[3] == 8
){
    signo = -1;
} else if(x[0] == 3 && x[1] == 4 && x[2] == 6 && x[3] == 7
){
    signo = -1;
} else if(x[0] == 3 && x[1] == 4 && x[2] == 6 && x[3] == 8
){
    signo = -1;
} else if(x[0] == 3 && x[1] == 5 && x[2] == 7 && x[3] == 8
){
    signo = -1;
} else if(x[0] == 3 && x[1] == 6 && x[2] == 7 && x[3] == 8
){
    signo = -1;
} else if(x[0] == 4 && x[1] == 5 && x[2] == 6 && x[3] == 7
){
    signo = -1;
} else if(x[0] == 4 && x[1] == 5 && x[2] == 7 && x[3] == 8
){
    signo = -1;
} else if(x[0] == 4 && x[1] == 6 && x[2] == 7 && x[3] == 8
){
    signo = -1;
}

return signo * pow(-1, inversiones);
}

```

3.4.3 Programa final

```

//LIBRARY HEADERS
#include <iostream>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <string>
#include <iomanip>

using namespace std;

```

```

//PROTOTYPES
void compute_print_matrix (int elements, int rank, char chirotop
e_mapping[]);
int chirotope(int tuple[], int elements, int rank, char chirotope_
mapping[]);
void print_chirotope (int elements, int rank, char chirotope_map
ping[]);
int combinatorial(int n, int k);
int combinatorialHash (int a[], int length, int max);
long fact(int);
void printArray(int a[], int);

int main(){
    int op = 0;
    int op2 = 0;
    int length_chirotope;
    int rank;
    int elements;
    int change_element;
    char value;

    system("cls");

    do {
        cout<<"\n\n\nMENU DE CHIROTOPE\n\n";
        cout<<"[ 1 ] CREAR UN NUEVO CHIROTOPE\n\n";
        cout<<"[ 2 ] SALIR \nOPCION ELEGIDA: ";
        cin>>op;

        switch (op) {
            case 1://CHIROTOPE
                cout<<"\n\nCREACION DE NUEVA MATROIDE";
                cout<<"\nINGRESE EL NUMERO DE ELEMENTO
S DE LA MATROIDE: ";
                cin>>elements;

                cout<<"INGRESE EL RANGO DE LA MATROIDE:
";
                cin>>rank;

                length_chirotope = combinatorial(elements, rank);
                //char chirotope_mapping [length_chirotope];
                char chirotope_mapping[600];

                for (int i = 0; i < length_chirotope; i++){
                    if(i % 3 == 0) chirotope_mapping[i] = '+';
                    else if(i % 3 == 1) chirotope_mapping[i] = '0';
                    else chirotope_mapping[i] = '-';
                }
                print_chirotope (elements, rank, chirotope_mapping);
                compute_print_matrix (elements, rank, chirotope_ma
pping);

            //CHANGE CHIROTOPE
            do {
                cout<<"\n\nCAMBIAR SIGNOS DEL CHIROPOT
E?\n";

                cout<<"[ 1 ] SI\n";
                cout<<"[ 2 ] NO \nOPCION ELEGIDA: ";
                cin>>op2;
                if(op2 == 2) {
                } else {
                    system("cls");
                    print_chirotope (elements, rank,
                    chirotope_mapping);
                }
            } while (op2 != 2);
        }
    } while (op != 2);
}

```

```

cout<<"\n\nTECLEA EL ELEMENTO
A CAMBIAR DEL CHIROTOPE: ";
cin>>change_element;

cout<<"\nVALOR DE REEMPLAZO ['-','0','+']
: ";

cin>>value;

if(value != '-' && value != '+') value = '0';
chirotope_mapping[change_element] = value;

print_chirotepe (elements,
rank, chirotope_mapping);
}
} while(op2 != 2); //do-while
compute_print_matrix (elements, rank, chirotope_ma
pping);
break;
case 2:
cout<<"\n\nFINALIZANDO PROGRAMA...\n";
//exit(0);
return 0;
break;
default: cout<<"\n\nOPCION NO DISPONIBLE\n";
} //switch
} while (op != 2);
//getch();
cin.ignore();
return 0;
} //int main

void compute_print_matrix (int elements, int rank, char chirotop
e_mapping[]) {
//DECLARING VARIABLES
int aux = 0;
int suma = 0;
int g[elements][elements];
int lim = pow(elements, rank);
int k = 0;
int tuple[rank];
int aux_chirotepe;

//COMPUTING SMATROID
cout<<"\n\nMATRIZ DE LA MATROIDE:\n";
for (int i = 0; i < elements; ++i) {
for (int j = 0; j < elements; ++j) {
suma = 0;

for (int j2 = 0; j2 < lim; j2++){
tuple[0] = i + 1;

i2 = j2;
for (int k = rank - 1; k > 0; k--){
tuple[k] = (i2 % elements) + 1;
i2 = i2 / elements;
}

aux_chirotepe = chirotope(tuple, elements, rank, chir
otope_mapping);
tuple[0] = j + 1;
aux_chirotepe *= chirotope(tuple, elements, rank, ch
irotepe_mapping);
suma += aux_chirotepe;
}
}
}

```

```

g[i][j] = suma;
cout<< setw(6)<< g[i][j]<< " ";
} //for-j
cout << "\n";
} //for-i
} //void calcular_matriz

//RETURN ASSOCIATED VALUE TO A TUPLE
int chirotope(int tuple0[12], int elements, int rank, char chirotop
e_mapping[]) {
int signo = 0;
int aux = 0;
int inversiones = 0;
int hash = 0;
int tuple[12];

for (int i = 0; i < rank; ++i) {
tuple[i] = tuple0[i];
} //for-i

for (int i = 0; i < rank - 1; ++i) {
for (int j = i + 1; j < rank; ++j) {
if (tuple[i] > tuple[j]) {
++inversiones;
aux = tuple[i];
tuple[i] = tuple[j];
tuple[j] = aux;
} else if (tuple[i] == tuple[j] && i != j) {
return 0;
}
} //for-j
} //for-i

hash = combinatorialHash(tuple, rank, elements);
if(chirotope_mapping[hash] == '+') signo = 1;
else if(chirotope_mapping[hash] == '-') signo = -1;
else return 0;

signo *= pow(-1, inversiones);
return signo;
} //int chirotope

void print_chirotepe (int elements, int rank, char chirotope_map
ping[]) {
cout<<"\n\nMAPEO DEL CHIROTOPE:\n";
int tuple[rank];
for(int i = 0; i < rank; i++){
tuple[i] = i + 1;
}

int hash;
int nck = combinatorial(elements, rank) - 1;
int i = 0;
int aux;
while(hash < nck){
hash = combinatorialHash(tuple, rank, elements);
cout<<hash<<"\n" << " ";
/*for(int j = 0; j < rank; j++){
cout<<tuple[j]<<" ";
if(j < rank - 1) cout<<" ";
}*/
printArray(tuple, rank);
cout<<"\n" << " --> " << chirotope_mapping[hash]<<"\n";
for(i = rank - 1; i >= 0; i--){

```


5. Análisis de Resultados

Un análisis preliminar demostró que ninguna de las matrices proporcionadas por el software cumple con las propiedades de la matroide que se espera represente.

Se demostró que, si una matroide tiene un rango r menor o igual a $n - 1$ (siendo n el número de elementos de la matroide), tendrá al menos un conjunto linealmente dependiente de cardinalidad $r + 1$.

$$\begin{aligned}
 M &= (\mathcal{E}, \mathcal{B}) \\
 n &= |\mathcal{E}| \\
 r &= \text{rank}(M) = |b|, \forall b \in \mathcal{B} \\
 \text{Si } r &\leq n - 1 \\
 &\Rightarrow \exists C \mid C \subseteq \mathcal{E}, |C| \geq r + 1 \\
 &\Rightarrow C \notin \mathcal{B}, \text{ y } C \not\subseteq b, \forall b \in \mathcal{B} \\
 &\Rightarrow C \text{ no es un conjunto l.i.*}
 \end{aligned}$$

*Linealmente independiente

(25)

Por lo anterior, su representación como una matriz cuadrada (de tamaño $n * n$) sobre el campo de los números reales \mathbb{R} , debe tener obligatoriamente un determinante igual a 0 (implicación directa de que existe un conjunto linealmente dependiente dentro del conjunto de vectores columna de una matriz). De no ser así, la matriz no es una representación válida de la matroide; puesto que todos los vectores son independientes.

Este último hallazgo, a la luz de las pruebas computacionales que corroboran que dicha fórmula no siempre devuelve matrices con determinante nulo, muestra que se requiere de una propiedad emergente para garantizar (o en su caso, descartar) la universalidad de la fórmula del doctor J. A. Nieto; y, por tanto, del software basado en su teoría.

Como parte del análisis de los resultados arrojados por el programa, se llegó a la siguiente conjetura:

Conjetura 1. *Se teoriza que la submatriz generada tomando sólo las primeras r filas de la matriz cuadrada calculada originalmente, será siempre una representación válida de la matroide. Sin embargo, se requiere una demostración estricta de esto para poder afirmarlo con total certeza.*

Ejemplos que sustentan la conjetura anterior son las siguientes matrices rectangulares de dimensiones $r * n$

(recuérdese que r es el rango de la matriz y n el número de elementos), que son submatrices de las originalmente calculadas con el software y que si representan a sus matroides correspondientes:

Matroide uniforme $U_{4,8}$

$$\begin{matrix}
 35 & 4 & 8 & -6 & 16 & 6 & 8 & -8 \\
 4 & 35 & 8 & 6 & -8 & 18 & -8 & -4 \\
 8 & 8 & 35 & 10 & -4 & -6 & 16 & -8 \\
 -6 & 6 & 10 & 35 & -6 & 4 & 10 & 18
 \end{matrix}$$

(26)

Matroide uniforme $U_{3,6}$

$$\begin{matrix}
 20 & 12 & 0 & 12 & 0 & -4 \\
 12 & 20 & -12 & 0 & 4 & 0 \\
 0 & -12 & 20 & 4 & 0 & -12
 \end{matrix}$$

(27)

Matroide uniforme $U_{2,6}$

$$\begin{matrix}
 5 & 4 & -2 & -4 & 2 & 0 \\
 4 & 5 & -4 & -2 & 0 & 2
 \end{matrix}$$

(28)

Matroide uniforme $U_{3,4}$

$$\begin{matrix}
 6 & -2 & -2 & -2 \\
 -2 & 6 & -2 & -2 \\
 -2 & -2 & 6 & -2
 \end{matrix}$$

(29)

Matroide uniforme $U_{2,4}$

$$\begin{matrix}
 3 & -2 & 2 & 0 \\
 -2 & 3 & 0 & 2
 \end{matrix}$$

(30)

Esta última matriz, a través de operaciones entre renglones y entre columnas, puede transformarse en la representación de la matroide $U_{2,4}$ ofrecida en la mayoría de libros y artículos [2][3][8]:

$$\begin{matrix}
 1 & 0 & 1 & 1 \\
 0 & 1 & 1 & -1
 \end{matrix}$$

(31)

Este resultado sugiere que, si bien el modelo de generación propuesto no garantiza representaciones válidas en forma cuadrada, sí podría funcionar como un

generador confiable de representaciones rectangulares, lo cual constituye una línea de investigación futura.

6. Conclusiones

El desarrollo de herramientas computacionales especializadas en estructuras matemáticas abstractas como las matroides orientadas representa un desafío interdisciplinar con múltiples aplicaciones potenciales en áreas como la geometría combinatoria, la optimización y la ciencia de datos.

En este contexto, el presente trabajo introduce un software escrito en C++ que permite generar representaciones matriciales de matroides orientadas a partir de un conjunto de elementos y su chirotope (χ), apoyado en una fórmula propuesta por el Dr. J. A. Nieto.

Dicho software es un esfuerzo pionero que, aunque incipiente, apunta a cubrir la falta de herramientas capaces de generar representaciones matriciales de matroides dadas, las cuales serían de gran utilidad tanto para la educación como para la investigación en este campo.

Su desarrollo atiende un vacío real en la literatura computacional sobre matroides orientadas. Además, sienta bases para futuros proyectos más integrados que vinculen teoría y práctica mediante algoritmos de verificación estructural y visualización dinámica de representaciones.

Respecto al primer prototipo ideado por D. Aldana, fue posible optimizar el algoritmo y, sobre todo, el uso de memoria del programa. Además de que se desarrollaron métodos que permiten extender el uso del programa a matroides de cualquier rango menor a 12, mientras que el prototipo original solo admitía matroides con rango 3 o 7.

Hasta la fecha, existen pocas herramientas que permitan calcular representaciones matriciales de matroides, y aún menos enfocadas en matroides orientadas. Algunas bibliotecas matemáticas computacionales permiten explorar propiedades de matroides (como SageMath [11] u Oid), pero no ofrecen funcionalidades específicas para generar representaciones matriciales directas de forma automatizada. Esta ausencia resalta la necesidad de contar con software especializado, y el trabajo aquí desarrollado busca cubrir parcialmente esa brecha.

Esta carencia actual de herramientas para trabajar con matroides orientadas puede atribuirse, en parte, a la complejidad de formalizar computacionalmente los axiomas de orientación y su traducción a estructuras matriciales.

Además, estudios sobre representaciones matriciales de matroides suelen centrarse en su existencia y condiciones algebraicas (por ejemplo, representabilidad sobre ciertos campos), pero rara vez en métodos constructivos automatizados. Por tanto, este desarrollo representa un paso inicial hacia la sistematización computacional del análisis de matroides orientadas desde una perspectiva constructiva y aplicable.

Como parte de la investigación, se encontraron resultados que exigen un mayor análisis sobre la fórmula propuesta por el doctor J. A. Nieto en [3], para así complementar su investigación y saber si dicha fórmula funciona para generar matrices de dimensiones $r * n$, saber en qué condiciones la fórmula es válida, o directamente refutarla.

Una de las principales limitaciones del enfoque presentado en este trabajo radica, justamente, en su dependencia de una fórmula cuya validez aún no ha sido formalmente demostrada. Aunque el software desarrollado permite generar matrices a partir de un chirotope y observar propiedades relevantes de matroides orientadas, la ausencia de una base teórica rigurosa que garantice la representabilidad de las matrices generadas compromete su aplicabilidad general.

Esto delimita el alcance del software a un uso exploratorio o educativo, más que a aplicaciones formales en investigación matemática avanzada. Además, la implementación actual no cuenta con un sistema de verificación automático que identifique inconsistencias algebraicas o violaciones de axiomas matroidales, o incluso que verifique si la matroide es representable antes de intentar encontrar su representación matricial. Esto plantea desafíos al momento de escalar su uso a instancias más complejas o de mayor dimensión.

Finalmente, este proyecto no solo representa una contribución funcional en la creación de herramientas específicas para el estudio computacional de matroides orientadas, sino que también plantea interrogantes relevantes que pueden enriquecer la comprensión teórica y práctica de estas estructuras. Se espera en el futuro encontrar resultados matemáticos que ayuden a complementar la teoría sobre la representación de matroides, tales como:

1. Generar un algoritmo que permita identificar computacionalmente cuando una matroide es o no es representable.
2. Ofrecer una demostración o refutación rigurosa de la conjetura expresada anteriormente, sobre las matrices de tamaño $r * n$ calculada con la fórmula del doctor J. A. Nieto, y sobre la propia fórmula.

3. Encontrar un algoritmo para calcular representaciones matriciales de cualquier matroide, con un sustento matemático estricto.

7. Referencias

- [1] Oxley, James, *Matroid Theory*, 2nd edn, Oxford Graduate Texts in Mathematics (Oxford, 2011; online edn, Oxford Academic, 17 Dec. 2013), <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198566946.001.0001>, accessed 3 May 2025.
- [2] J. Oxley, WHAT IS A MATROID? 1991, pp. 1–45.
- [3] N. G. J. Antonio and Marín Miriam Christina, *Elementos de la Teoría de Matroides*. El Colegio de Sinaloa, 2005.
- [4] R. F. M. Jean Cardinal and C. Hidalgo-Toscano, “Chirotopes of Random Points in Space are Realizable on a Small Integer Grid,” 2020. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:210859350>
- [5] J. Geelen and P. Nelson, “The number of lines in a matroid with no U_2, n -minor,” *European Journal of Combinatorics*, vol. 50, pp. 115–122, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejc.2015.03.026>.
- [6] C. Merino, M. Ramírez-Ibáñez, and G. Sanchez, “The Tutte Polynomial of Some Matroids,” *International Journal of Combinatorics*, vol. 2012, Feb. 2012, doi: 10.1155/2012/430859.
- [7] J. Valero and I. Lizarazo, “Multispectral image classification from axiomatic locally finite spaces-based segmentation,” *UD y la geomática*, no. 13, 2019, doi: 10.14483/23448407.15230.
- [8] J. A. Nieto, *Oriented Matroid Theory as a Mathematical Framework for M-Theory*. 2006. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/hep-th/0506106>
- [9] E. Gawrilow y M. Joswig, “Polymake: a framework for analyzing convex polytopes,” en *Polymake Documentation*, [En línea]. Disponible en: <https://polymake.org/doku.php/documentation/latest/matroid>. [Accedido: 10-may-2025].
- [10] S. Kingan, “Oid: a software system for matroids,” [En línea]. Disponible en: <https://userhome.brooklyn.cuny.edu/skingan/matroids/software.html>. [Accedido: 10-may-2025].
- [11] The Sage Developers, *Matroid Theory – SageMath Documentation*, versión 10.6, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doc.sagemath.org/html/en/reference/matroids/index.html>. [Accedido: 10-may-2025].
- [12] Maplesoft, “Matroids – Maple Help,” [En línea]. Disponible en: <https://www.maplesoft.com/support/help/Maple/view.aspx?path=Matroids>. [Accedido: 10-may-2025].
- [13] A. Solana Hernández, “Path planning strategies for navigation of mobile robots,” *Procedia Computer Science*, vol. 133, pp. 746–753, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914718305130>. [Accedido: 10-may-2025].
- [14] Woodall. “Types of matroids”. MathsNet: School of Mathematical Sciences Intranet Pages. Accedido el 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.maths.nottingham.ac.uk/plp/pmadw/PG/matroid.ch3.pdf>

Lenguajes de programación para la estadística: R, Python y Julia.

Programming languages for statistics: R, Python and Julia.

Raymundo Bueno-Rivera¹, Raúl Quevedo García², Jesús Andrés Aguilar Quiroz³, Juan José López Tirado⁴, Alan Ramírez-Noriega⁵

¹Facultad de Informática Culiacán, Universidad Autónoma de Sinaloa, México.

²Facultad de Informática Culiacán, Universidad Autónoma de Sinaloa, México.

³Facultad de Informática Culiacán, Universidad Autónoma de Sinaloa, México.

⁴Facultad de Informática Culiacán, Universidad Autónoma de Sinaloa, México.

⁵Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa, México.

Autor de Correspondencia: Raymundo Bueno Rivera, e.raymundo.bueno@uas.edu.mx, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7742-267X>

Recibido: Enero 2025, **Aceptado:** Marzo 2025, **Publicado:** Mayo 2025

Resumen:

La estadística y la probabilidad forman parte del área de matemáticas, y permiten llevar a cabo el análisis de datos, implementando metodologías desde la selección, recolección, tratamiento y presentación de resultados. En este artículo se presenta una comparación del uso de los lenguajes de programación R, Python y Julia como herramientas de apoyo en estas áreas. Esta comparación se llevó a cabo utilizando conjuntos de datos (datasets) para hacer cálculos estadísticos y probabilísticos con cada uno de los lenguajes, lo que permitió evaluar los procedimientos desde la apreciación de los autores, esta evaluación se realizó utilizando una rúbrica enfocada en aspectos cualitativos, los resultados obtenidos se compararon a partir de una escala de Likert con lo que se concluyó que el mejor lenguaje como herramienta de apoyo para esta área es R.

Palabras Clave: Probabilidad y estadística, lenguaje R, Python, lenguaje Julia, comparación de lenguajes de programación.

Abstract:

Probability and statistics is an area from Mathematics, its main purpose is to take over data analysis by applying very specific methods to activities like data selection, data gathering, data treatment and results showing. In this article is shown a comparison of three different programming languages as a support tool for this area, these languages are Python, R and Julia. This study was taken over with different data sets to develop some statistics and probability operations with each of the programming languages, this allowed to evaluate the procedures from the perspective of the authors. This evaluation was done using rubric oriented in qualitative aspects. The obtained results were compared using a Likert scale in which the conclusion was that R is the best language to use as a support tool for this area.

Index Terms: Statistics and probability, R language, Python, Julia language, comparison of programming languages.

1. Introducción

En el estudio y análisis de fenómenos físicos, sociales, químicos y de cualquier índole es de bastante relevancia la aplicación de la estadística, ya que esta es una rama que estudia las formas de recolectar los datos, ordenarlos, mostrarlos e interpretarlos, esto con la finalidad de sacar conclusiones de ellos [1].

La misma estadística se puede dividir en dos grandes categorías, descriptiva e inferencial [2], donde la primera es un poco más intuitiva y se enfoca primordialmente con técnicas para recolectar, ordenar y mostrar la información a través de gráficas o tablas, de tal manera que su representación sea significativa y permita observar aspectos relevantes de los datos estadísticos, o bien muestre un resumen de estos.

Mientras que la segunda permite determinar generalidades o un comportamiento de una población, a partir de datos obtenidos de una muestra representativa de la misma. Donde se entiende como muestra a una parte de la población [3]. Para lograr esto se deben utilizar correctas técnicas de muestreo, hacer cálculos de medidas de tendencia central y de dispersión, y que estas sean de apoyo para definir y estimar el comportamiento de la población.

Pero entonces, ¿Al estimar el comportamiento de una población significa que esto va a suceder con certeza?, en este caso solo se puede determinar el comportamiento con un grado o porcentaje de certeza, la ciencia encargada de determinar eso se le llama probabilidad, si bien está fuertemente ligada con la estadística, esta última es la encargada de la recolección de los datos mientras que la probabilidad utiliza esos datos para determinar el grado de certeza de que algo ocurra [4].

Dicho lo anterior y llevando la probabilidad y estadística a un nivel un poco más elevado, es posible utilizarlas para realizar predicciones, que es una tarea común en ciencias de la información. Un ejemplo es el uso de algoritmos de aprendizaje automático, donde el grado de certeza se relaciona con la incertidumbre del algoritmo de que la predicción sea correcta [5].

Lo anterior lleva indiscutiblemente a trabajar con conjuntos de datos cada vez más grandes, lo que aumenta considerablemente el tiempo que demanda realizar esas tareas, entonces, ¿Cuáles son las alternativas para manejar grandes cantidades de información?

Para solucionar ese problema se han desarrollado computadoras y lenguajes de programación que permiten realizar cálculos matemáticos complejos y análisis de grandes cantidades de datos. Entre estos se puede destacar el lenguaje R que fue creado específicamente para solucionar problemas estadísticos, pero este no es el único lenguaje que se utiliza para este ámbito, un lenguaje de

propósito general que cuenta con una gran cantidad de módulo de apoyo para la estadística es Python.

El resto de los lenguajes existentes también se pueden utilizar también como apoyo para la probabilidad y estadística, aunque es probable que la complejidad aumente debido a que se necesitan mayor experiencia como programador. Un ejemplo de lenguaje de programación reciente es Julia.

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis comparativo entre 3 lenguajes de programación para determinar ventajas y desventajas de su uso al graficar o emplear operaciones básicas de probabilidad y estadística. En el siguiente capítulo se muestra una descripción de cada uno de los lenguajes a comparar, R, Python y Julia.

En el capítulo 3 se describe la metodología que se siguió, se mencionan los conjuntos de datos utilizados. En el capítulo 4 se describe el instrumento de evaluación y los aspectos a evaluar, desde la perspectiva de los autores.

Finalmente, en el capítulo 5 y 6 se discuten los resultados y se mencionan las conclusiones de este comparativo.

2. Trabajos Relacionados

b. *Lenguajes de programación*

2.1.1. Lenguaje R

R es un lenguaje y entorno para la computación estadística y gráficos. Es un proyecto GNU similar al lenguaje y entorno S, desarrollado en los Laboratorios Bell (antes AT&T, ahora Lucent Technologies) por John Chambers y sus colegas. R puede considerarse una implementación diferente de S. Existen algunas diferencias importantes, pero gran parte del código escrito para S se ejecuta sin alteraciones en R [6].

Uno de los puntos fuertes de R es la facilidad con la que se pueden producir gráficos bien diseñados con calidad de publicación, incluyendo símbolos matemáticos y fórmulas cuando sea necesario. Se ha puesto gran cuidado en los valores por defecto para las opciones de diseño menores en gráficos, pero el usuario conserva el control total [6].

R está disponible como Software Libre bajo los términos de la Licencia Pública General GNU de la Fundación para el Software Libre en forma de código fuente. Se compila y ejecuta en una amplia variedad de plataformas UNIX y sistemas similares (incluyendo FreeBSD y Linux), Windows y MacOS [6].

R, al igual que S, está diseñado en torno a un verdadero lenguaje informático, y permite a los usuarios añadir funcionalidades adicionales mediante la definición de nuevas funciones. Gran parte del sistema está escrito en el dialecto R de S, lo que facilita a los usuarios el

seguimiento de las decisiones algorítmicas tomadas. Para tareas de cálculo intensivo, se puede enlazar código C, C++ y Fortran e invocarlo en tiempo de ejecución. Los usuarios avanzados pueden escribir código C para manipular objetos R directamente [6].

2.1.2. Lenguaje Python

Python es un lenguaje de programación que utiliza estructuras de datos de alto nivel, de igual forma permite programar con una estructura orientada a objetos. El intérprete de Python permite hacer referencia a instrucciones y funciones utilizadas en C o C++, además de otros lenguajes que puedan ser llamados desde C [7].

Este lenguaje utiliza un intérprete que funciona en distintos sistemas operativos, como lo son Windows, Mac-OS o Linux, esto le permite al usuario seleccionar el aquel sistema operativo que mejor se adapte a sus necesidades.

Otra característica relevante de este lenguaje es el reducido número de líneas de código que se necesitan para desarrollar un programa si se compara con lenguajes como C o C++. Esto se debe a que el intérprete permite utilizar variables sin declararlas en líneas anteriores, lo cual se vuelve muy amigable para programadores novatos.

Finalmente, otro aspecto a destacar de este lenguaje es que existe una gran variedad de módulos que son libres y cuentan con bastante documentación en línea, los cuales están diseñados para realizar tareas específicas como la lectura de documentos, cálculos estadísticos, creación de gráficas, por destacar algunas.

2.1.3. Lenguaje Julia

Julia fue lanzado originalmente en 2012 por Alan Edelman, Stefan Karpinski, Jeff Bezanson y Viral Shah. Es un lenguaje de programación gratuito y de código abierto. Del cual se pueden destacar las siguientes características [8]:

- Julia está desarrollado como un lenguaje de programación de alto rendimiento.
- Julia usa envío múltiple (“multiple dispatch” en inglés), que le permite al programador elegir entre diferentes patrones de programación de acuerdo con la aplicación.
- Julia es un lenguaje de tipo dinámico que se puede usar fácilmente de forma interactiva.
- Julia tiene una sintaxis de alto nivel que es fácil de aprender.
- Julia es un lenguaje de programación con tipos opcionales, cuyos tipos de datos (definidos por el usuario) hacen que el código sea claro y robusto.
- Julia tiene una biblioteca estándar extendida, además, están disponibles numerosos paquetes de terceros.

Estas características lo convierten en un lenguaje de programación único, ya que resuelve el problema de los dos idiomas, fácil entendimiento y no se necesita de ningún otro lenguaje de programación para escribir código de alto rendimiento. Aunque esto no significa que ocurra automáticamente, es responsabilidad del programador optimizar el código para evitar que genere cuellos de botella, aunque esto puede hacerse directamente en Julia [8].

3. Metodología.

Para llevar a cabo la comparación de estos tres lenguajes de programación en la resolución de problemas de estadística y probabilidad se procedió a seleccionar conjuntos de datos y procesarlos en R, Python y Julia. En la figura 1 y 2 se muestra un esquema de la metodología implementada.

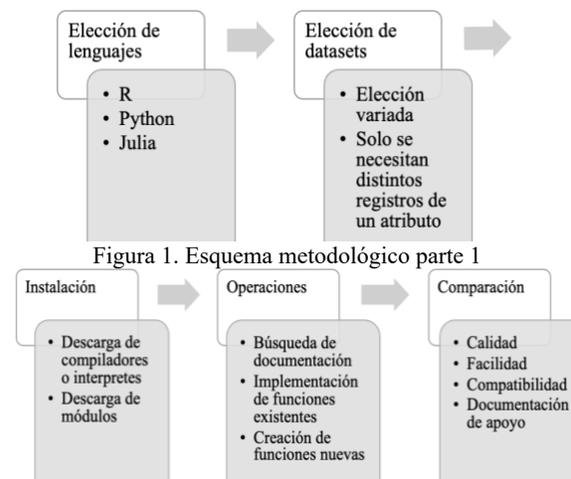


Figura 2. Esquema metodológico parte 2

En el bloque llamado operaciones se realizan las mismas actividades para cada lenguaje de programación, el resultado y el proceso de estas actividades se utilizan para realizar una evaluación cualitativa de calidad, facilidad, compatibilidad y documentación de apoyo.

3.1.1 Cálculos estadísticos

Para desarrollar esta etapa se utilizaron los conjuntos de datos de Iris [9], Superconductivity [10] y Heart Disease [11]. Los cuales son de acceso libre y cuentan con atributos de tipo numérico que permiten llevar a cabo las operaciones estadísticas que se desean probar, las cuales fueron las siguientes:

- Media, media recortada, mediana, varianza y desviación estándar.
- Gráficos de dispersión
- Histograma
- Gráfico de caja y bigotes (boxplot)
- Diagrama de tallos y hojas

En los siguientes apartados se mencionan los procedimientos que se tienen que seguir para cada uno de los lenguajes de programación y los resultados que se obtienen al ejecutar los códigos.

3.1.2 Uso de R

En el caso de este lenguaje de programación no es necesario instalar módulos, solamente se cargan los datos en un objeto y se ejecutan las instrucciones para obtener el resultado que se busque, en la siguiente lista se muestran algunas de las más sencillas:

- MEAN para media.
- MEDIAN para mediana.
- MEAN (datos, trim=valor) donde valor representa un número real entre (0-1) con el porcentaje a recortar.
- MAX(datos)-MIN(datos) calcula el rango de los valores.

3.1.3 Uso de Python

Para los cálculos relevantes de Probabilidad y Estadística como lo son media, mediana, desviación estándar o rango, no es necesario realizar instalaciones de otros módulos, pero sí es necesario declarar la importación de esos módulos al código, para crear objetos y clases que cuenten con esas funciones.

Mientras que para la creación y manejo de gráficos en Python es necesario realizar una instalación extra de módulos específicos. De acuerdo con los tipos de gráficos que se realizaron en esta actividad se instalan los siguientes módulos por medio de la consola de la computadora:

- matplotlib: Para los gráficos comunes como dispersión, histograma, boxplot, barras, etc.
 - stemgraphic: Para el diagrama de tallos y hojas
- Ambos módulos se tienen que importar en el código del programa.

3.1.4 Uso de Julia

En el caso de uso de Julia es algo muy similar a lo que sucede en R, no hay necesidad de instalar módulos extras para los cálculos básicos o relevantes de probabilidad y estadística, simplemente la ejecución de las instrucciones.

4. Resultados

De manera general los tres lenguajes de programación utilizados mostraron buenas cualidades para trabajar cálculos estadísticos y creación de gráficos, en las siguientes tablas se muestra un resumen de los aspectos evaluados, esto desde la percepción de los autores que realizaron la actividad usando ese lenguaje.

La evaluación de los lenguajes de programación se llevó a cabo con una rúbrica, en la que se evaluaron los

atributos de la siguiente lista con una escala de: Excelente, bueno, regular, mal y muy mal.

- A. Facilidad de instalación
- B. Documentación de apoyo
- C. Instalación de plugins o librerías
- D. Complejidad del lenguaje
- E. Configuración de los parámetros de las funciones
- F. Calidad de los gráficos

En las Tablas 1, 2 y 3 se muestra la evaluación otorgada en cada atributo y una descripción justificando esa valoración.

Tabla 1. Evaluación de la experiencia usando R.

Atributo	Lenguaje: R
A	Excelente
	El proceso de instalación en Windows y MacOS está bien definido.
B	Excelente
	Bastante documentación proporcionada por R, bastantes blogs de usuarios con asistencia.
C	Excelente
	Es posible realizar la instalación directamente desde la terminal de RStudio.
D	Excelente
	Sintaxis muy sencilla, intuitiva y fácil de aprender. R puede ser un buen primer lenguaje de programación.
E	Excelente
	Existen varios argumentos para cada función, que permiten una excelente personalización de cada gráfico.
F	Excelente
	Los gráficos en R están muy bien definidos, los argumentos de cada función permiten una gran variedad de personalizaciones.

Tabla 2. Evaluación de la experiencia usando Python.

Atributo	Lenguaje: Python
A	Excelente

Atributo	Lenguaje: Python
	Tanto para Windows como en MacOS es un proceso muy sencillo y mecánico.
B	Bueno
	La cantidad de documentación que existe bastante, solo en el gráfico de tallos y hojas fue muy escasa.

Tabla 2. Evaluación de la experiencia usando Python (continuación).

Atributo	Lenguaje: Python
C	Regular
	La instalación es sencilla, pero se necesita conocer el trabajo en consola.
D	Excelente
	No se necesita tener mucho conocimiento del lenguaje para usarlo, ya que simplifica muchos aspectos de diseño.
E	Bueno
	La configuración es sencilla, sin embargo y sobre todo en gráfico no es muy claro y se tiene que realizar varias pruebas para encontrar la configuración deseada.
F	Bueno
	Gráficos muy bien definidos, la especificación depende del programador.

Tabla 3. Evaluación de la experiencia usando Julia.

Atributo	Lenguaje: Julia
A	Excelente
	La instalación de Julia en Windows, Linux y MacOS es bastante sencillo
B	Regular
	La cantidad de documentación en sitios oficiales de las librerías o extensiones esta completa pero falta de actualización para versiones de julia recientes
C	Bueno

	La instalación mediante REPL de Julia hace el proceso de instalación fácil.
D	Excelente
	Posee una sintaxis similar a Python por lo que al usuario principiante puede ser otra opción como lenguaje inicial.
E	Regular
	La configuración de las funciones es fácil de realizar, sin embargo, algunas funciones no son compatibles con la última versión de Julia y además la configuración de los gráficos es más problemática.
F	Regular
	Los gráficos realizados por Julia tienen una excelente calidad de imagen y pueden ser configurables, sin embargo, este último aspecto puede ser más difícil obtener el resultado deseado.

Los resultados obtenidos en las tablas 1, 2 y 3 se concentran en un gráfico de frecuencias que se muestra en la figura 3. En este gráfico se agrupan por lenguaje cuántas valoraciones de cada tipo obtuvieron.

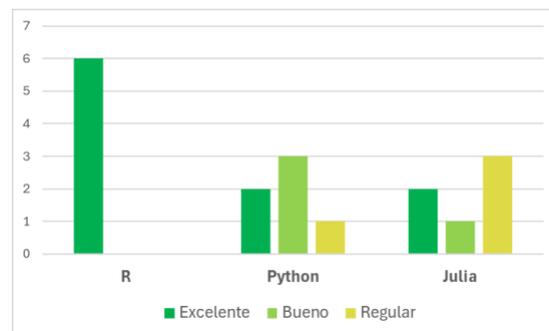


Figura 3. Gráfica de frecuencias de las evaluaciones

5. Análisis de Resultados

A partir de los resultados se puede observar que el lenguaje que más valoraciones excelentes obtuvo fue R mientras que el lenguaje que obtuvo más valoraciones regulares fue Julia. Estos datos permiten obtener información de que, de los tres lenguajes utilizados en este experimento, R es el que sería más sencillo y adecuado para utilizar como apoyo en la probabilidad y estadística.

Algo a destacar es que ninguno de los lenguajes obtuvo valoraciones en malas o muy malas, lo que significa que se encuentran dentro de rangos aceptables aun con pocas nociones de programación, además de que los tres están valorados como excelente en la complejidad del lenguaje.

Un aspecto para destacar es que, si se desea utilizar Julia como herramienta de apoyo en Probabilidad y Estadística, se debería tener el tiempo y dedicación de buscar documentación sobre las funciones que utiliza, ya que en comparación con los otros dos lenguajes su contenido en la red es muy bajo.

Mientras que Python obtuvo principalmente valoraciones buenas y excelentes, y su única valoración regular es en la instalación de plugins o módulos, por lo tanto, si no se requieren de módulos fuera de la instalación estándar del intérprete, es posible considerarlo una herramienta eficaz para cualquier persona con poco conocimiento en programación y con la necesidad de resolver problemas específicos de probabilidad y estadística.

6. Conclusiones

Los aspectos más importantes para resaltar en este artículo es que se aprovecharon los lenguajes de programación existentes para resolver problemas de probabilidad y estadística, en este caso particular todas las personas involucradas tenían conocimientos previos de programación en otros lenguajes, lo que les permitió adaptarse rápido a los lenguajes utilizados para este artículo. Por lo tanto, sería importante valorarlo con personas que tuvieran menos experiencia en programación.

Además, en este artículo se muestran valoraciones sobre la sencillez y versatilidad de los lenguajes de programación, donde R fue el que obtuvo mejores resultados. Sin embargo, no se evalúa en ningún momento cuál es más eficiente que el otro, ¿Si se evaluara eficiencia, R seguiría siendo el mejor?

Esto último es una propuesta de trabajo futuro, que permitiría llevar esta comparación a un nivel más profundo, con la implementación de una metodología diferente, enfocada a generar resultados cuantitativos para realizar una comparación equitativa.

7. Referencias

- [15]M. Spiegel, *Estadística*, España: McGraw-Hill, 2013.
- [16]D. Lind, R. D. Mason y W. G. Marchal, *Estadística para administración y economía*, España: McGraw-Hill, 2000.
- [17]G. Posada, *Elementos básicos de estadística descriptiva para el análisis de datos*, Colombia: Fundación Universitaria Luis Amigó, 2016.

- [18]D. Anderson, D. Sweeney y T. Williams, *Statistics for Business and Economics (10a. ed.)*, E.U.A.: South-Western College Pub, 2018.
- [19]Z. Ghahramani, "Probabilistic machine learning and artificial intelligence", *Nature*, Vol. 521, No. 7553, pp. 452–459, 2015. Disponible: <https://doi.org/10.1038/nature14541>
- [20]The R Foundation, *What is R*, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.r-project.org/>
- [21]Python Software Foundation, *El tutorial de Python*, 2025. [En línea]. Disponible: <https://docs.python.org/>
- [22]A. Downey, B. Laurens, *Introducción a la programación en Julia*, 2018. [En línea]. Disponible: <https://introajulia.org/>
- [23]R. Fisher, "Iris", UCI Machine Learning Repository, 1936. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.24432/C56C76>.
- [24]K. Hamidieh, "Superconductivity Data", UCI Machine Learning Repository, 2018. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.24432/C53P47>.
- [25]A. Janosi, W. Steinbrunn, M. Pfisterer, y R. Detrano, "Heart Disease", UCI Machine Learning Repository, 1989. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.24432/C52P4X>.

Manipulación gestual de robots mediante visión artificial

Gesture-based robots manipulation using computer vision

Adriana Lizbeth González Sarabia¹, Claudio Manuel Domínguez Ulloa¹

¹Facultad de Informática Culiacán / Posgrado en Ciencias de la Información, Universidad Autónoma de Sinaloa, México.

Autor de Correspondencia: Adriana Sarabia, adrianagonzalez.fim@uas.edu.mx, <https://orcid.org/0009-0001-4749-9908>

Recibido: Enero 2025, **Aceptado:** Marzo 2025, **Publicado:** Mayo 2025

Resumen:

Este artículo aborda la manipulación gestual de robots articulados mediante visión artificial, con el objetivo de permitir su control remoto para la realización de tareas específicas. La manipulación gestual se ha convertido en una alternativa intuitiva y eficiente dentro de los sistemas de teleoperación, ya que permite una interacción natural entre el ser humano y el robot. Se presenta una breve taxonomía de los sistemas de control gestual, clasificándolos en dos enfoques principales: aquellos basados en sensores físicos (como guantes o dispositivos inerciales) y los que utilizan visión artificial. Este estudio analiza el segundo enfoque, explorando distintas metodologías que permiten reconocer gestos humanos a partir de imágenes o secuencias de video, procesadas por algoritmos de visión por computadora. Se analizan propuestas existentes que permiten mapear dichos gestos en comandos para el control de robots articulados, considerando aspectos como la precisión del reconocimiento, latencia y la adaptabilidad del sistema. A través del análisis comparativo de estas metodologías, se identifican ventajas, limitaciones y posibles áreas de mejora. Los resultados evidencian el potencial de los sistemas basados en visión artificial para ofrecer una interacción más libre y natural, sin necesidad de equipo adicional, lo que puede traducirse en soluciones más accesibles y versátiles.

Palabras Clave: Manipulación-gestual, teleoperación, robots.

Abstract:

This article addresses the gestural manipulation of articulated robots through computer vision, with the aim of enabling their remote control for the execution of specific tasks. Gestural manipulation has become an intuitive and efficient alternative within teleoperation systems, as it allows for natural interaction between humans and robots. A brief taxonomy of gestural control systems is presented, classifying them into two main approaches: those based on physical sensors (such as gloves or inertial devices) and those that use computer vision. This study analyzes the second approach, exploring various methodologies that enable the recognition of human gestures from images or video sequences processed by computer vision algorithms. Existing proposals that map these gestures into commands for the control of articulated robots are analyzed, considering aspects such as recognition accuracy, latency, and system adaptability. Through a comparative analysis of these methodologies, advantages, limitations, and potential areas for improvement are identified. The results highlight the potential of computer vision-based systems to offer freedom and more natural interaction, without the need for additional equipment, which can lead to more accessible and versatile solutions.

key words: Gestual control, computer vision, teleoperation, human-robot interaction.

Agradecimientos a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) por el apoyo recibido para la realización de esta investigación, CVU: 1298047. Al Posgrado en Ciencias de la Información a la Facultad de Informática de Culiacán de la Universidad Autónoma de Sinaloa, por recibirme en el programa de Maestría en Ciencias de la Información

1. Introducción

La manipulación gestual es la forma más natural de interacción con un robot a través de un ambiente virtual, es por eso que reconocer e interpretar los movimientos del usuario, mediante algún sensor o dispositivo de visión, permite recolectar, analizar y codificar la información para ser transmitida y reproducida por un manipulador [1] [2].

Según [3], existe una taxonomía de los gestos de la mano para este tipo de control de sistema, dividida en dos grupos; los que son basados en sensores y los que son basados en visión. Los que son basados en sensores se pueden agrupar en tres categorías; mediante guantes de datos, mediante señales EMG y mediante WI-FI, por otro lado, los que están basados en visión, son las cámaras monoculares, binoculares y de profundidad como la RGB-D de Intel y los dispositivos Kinect de Microsoft, por mencionar algunos.

En este artículo se analizarán las propuestas metodológicas que se han presentado en el estado del arte, donde se hace el uso de la manipulación gestual mediante la visión artificial, ósea que el operador no necesita cargar en sus manos algún dispositivo físico para control el robot, el cual lo hace a distancia por medio de un sistema de realidad virtual, en el que la escena real está simulada.

Entonces, los entornos de realidad virtual, según las investigaciones recientes, se definen como una herramienta indispensable para el seguimiento del progreso en la manipulación gestual de robots, permitiendo una evaluación precisa y una retroalimentación en tiempo real de los indicadores de desempeño del sistema de control [4].

Actualmente existen diferentes formas de capturar los movimientos para poder obtener información del estado actual del cuerpo humano, de sus extremidades o articulaciones [5]. Los sistemas MoCap (Motion capture o captura en movimiento), permiten la captura de los movimientos lineales y coordenadas angulares, así como, velocidades y aceleraciones [6]. Sistemas que tienen incorporadas técnicas con marcadores y otras que no lo requieren como Kinect, estos tipos de control de sistemas, se pueden controlar a través de sensores o a través de la visión [3].

2. Trabajos Relacionados

En [7], se desarrolla un sistema de interacción humano-robot (HRI) que utiliza gestos dinámicos de la mano para controlar robots cuadrúpedos equipados con un brazo robótico. El sistema emplea un marco Depth-MediaPipe para la extracción precisa de coordenadas tridimensionales (3D) de 21 puntos clave de la mano. Posteriormente, se implementa un modelo Semantic-Pose to Motion (SPM) que interpreta tanto la pose como la

semántica de los gestos para traducirlos en acciones mecánicas en tiempo real, incluyendo la locomoción del robot y el seguimiento del efector final del brazo robótico.

En [8], se diseñó un sistema de control gestual para un brazo robótico en líneas de ensamblaje pequeñas. Utilizando visión por computadora, el sistema reconoce gestos específicos de la mano para controlar los movimientos del brazo robótico, mejorando la eficiencia y reduciendo la necesidad de interfaces físicas tradicionales.

En [9], se desarrolló un algoritmo para la teleoperación de robots móviles basado en el reconocimiento de gestos utilizando un sensor LeapMotion. El sistema implementa un filtro Gaussiano para suavizar y eliminar el ruido de los datos de gestos recogidos, mejorando la robustez y estabilidad del movimiento del robot. El control se realiza a través de una estructura cliente/servidor, permitiendo la asociación de gestos con comandos específicos del robot.

En [10], presentaron AutoNav, un sistema de teleoperación para múltiples robots que utiliza el reconocimiento de la palma de la mano como interfaz de control. Integrando el marco MediaPipe con el Sistema Operativo de Robots (ROS), el sistema permite la navegación autónoma y comandos gestuales interpretados a través de visión por computadora. Los resultados mostraron una reducción del 50% en el tiempo de ejecución y una disminución en las colisiones durante la teleoperación de los robots TurtleBot3.

En [11], se propone un sistema de reconocimiento de gestos de largo alcance mediante una cámara web convencional, orientado a la interacción humano-robot (HRI). El enfoque combina técnicas de visión artificial con aprendizaje automático para detectar gestos a distancias mayores a las tradicionales donde se requería cierta proximidad del usuario dependiendo del sensor, de esta manera se facilita la interacción sin necesidad de sensores especializados. A pesar de su bajo costo, la precisión disminuye conforme aumenta la distancia entre el usuario y la cámara.

En [12], se introduce un modelo de aprendizaje continuo de gestos de la mano para HRI, que permite que el sistema incorpore nuevos gestos a lo largo del tiempo sin olvidar los anteriores. Se utiliza una arquitectura basada en redes neuronales que se actualiza dinámicamente con nuevos datos, promoviendo una adaptación constante a diferentes usuarios y entornos. Esta característica lo hace adecuado para entornos cambiantes, aunque depende de la calidad de los datos previos para su rendimiento.

En [13], se presenta un modelo híbrido profundo basado en una red neuronal convolucional (CNN) y memoria a largo plazo y corto plazo (LSTM) para el

reconocimiento de gestos dinámicos en interfaces de interacción humano-computadora. El sistema extrae características espaciales y temporales de secuencia de video, permitiendo una detección precisa de gestos en tiempo real. Este enfoque es eficaz para comandos continuos, aunque requiere recursos computacionales elevados para su entrenamiento y ejecución.

En [14], se realiza una revisión exhaustiva sobre los sistemas de percepción en entornos industriales para HRI, analizando diferentes enfoques sensoriales, incluyendo cámaras RGB, sensores de profundidad y fusión de datos. El estudio destaca los desafíos de operar en ambientes con ruido visual y restricciones espaciales, proporcionando soluciones mediante sistemas híbridos y algoritmos robustos. Se identifican áreas clave de mejora en la integración entre visión artificial y control robótico.

En [15], se desarrolla un marco basado en aprendizaje profundo para reconocer gestos tanto estáticos como dinámicos utilizando cámaras RGB. El sistema emplea atención espacial-temporal para capturar secuencia de movimientos complejas mejorando la precisión en entornos no estructurados. Este enfoque es útil para aplicaciones donde los gestos varían ampliamente, aunque requiere una fase intensiva de entrenamiento previo.

En [16], se introduce GestLLM, un sistema innovador que aprovecha modelos de lenguaje de gran escala (LLM) junto con visión por computadora para interpretar gestos manuales en interacciones humano-robot. El sistema combina información visual con inferencia semántica, permitiendo la comprensión de intenciones más allá de gestos predefinidos. Su principal fortaleza es la flexibilidad interpretativa, aunque depende de la calibración precisa entre los modelos visuales y lingüísticos.

3. Metodología.

Esta sección presenta una revisión detallada de las metodologías actuales en la manipulación gestual de robots mediante visión artificial, enfocándose en sistemas que no requieren dispositivos físicos adicionales para el reconocimiento de gestos.

Para la presente revisión metodológica no se aplicó un criterio sistemático o filtrado especializado en la selección de los artículos analizados. En su lugar, se optó por incluir únicamente publicaciones de acceso abierto que abordaran directamente la manipulación gestual de robots mediante visión artificial. La elección de estos trabajos se fundamentó en la disponibilidad pública de los contenidos y en su pertinencia con respecto al tema central de esta investigación. A partir de esta base, se realiza un análisis exploratorio de cada propuesta seleccionada, desglosando su funcionamiento desde la etapa de captura o entrada de

datos, pasando por el reconocimiento de gestos y el tratamiento de la información, hasta llegar a la ejecución final de la tarea asignada al robot. Este enfoque permite identificar las características distintivas de cada metodología y establecer comparaciones claras entre ellas.

Tabla 1. Comparación de las Metodologías.

Metodología	Captura	Gestos	Aplicación	Ventajas	Límite
Xie et al. (2025)	Cámara RGB-D MediaPipe	Dinámicos	Robot cuadrúpedo con brazo	Control preciso en 3D	Configuración compleja
Angelidis y Bampis (2025)	Cámara RGB	Estáticos	Brazo en ensamblaje	Implementación sencilla	Limitados a gestos definidos
Chen et al. (2024)	Sensor LeapMotion	Ambos	Robot móvil	Suavizado de movimientos. Cliente/servidor	Latencia de 140- 200ms
Zick et al. (2024)	Cámara RGB con MediaPipe	Estáticos	Múltiples robots	Menos colisiones	Sensible a la luz
Banami et al. (2024)	Webcam (Larga distancia)	Estáticos	Interacción H-R de largo alcance	Bajo costo	Precisión reducida con la distancia
Cucurull & Garrell (2023)	Cámara RGB	Estáticos	Aprendizaje continuo	Adaptación a nuevos gestos	Dependencia de datos previos
Ramalingam & Angappan. (2023)	Cámara RGB + CNN-LSTM	Dinámicos	Interacción hombre-máquina	Reconocimiento preciso en tiempo real	Requiere alto poder computacional
Bonci et al. (2021)	Variada (RGB, sensores)	Ambos	Entornos industriales	Integración sensorial robusta	Complejidad del entorno
Mazhar et al. (2021)	Cámara RGB	Estáticos y dinámicos	Interfaces H-R en visión artificial	Modelo híbrido con atención especial	Alto costo computacional para entrenamiento
Kobzarev et al. (2025)	Cámara RGB + MediaPipe + LLM	Estáticos y dinámicos	Amplia interacción H-R en lenguaje natural	Interpretación de flexible de gestos	Requiere ajuste del modelo base

3.1. Técnica de captura de gestos

La captura de gestos es fundamental para la interacción humano-robot (HRI) y se basa en el uso de sensores ópticos, cámaras RGB-D o dispositivos portátiles. En [7], emplean una cámara de profundidad para capturar movimientos dinámicos de la mano, utilizando el algoritmo *MediaPipe Hands* para detectar puntos clave. La representación matemática de la posición de la mano en el espacio 3D se cómo:

$$\mathbf{P}(t) = [x(t), y(t), z(t)]^T \quad (1)$$

Donde $\mathbf{P}(t)$ es el vector de posición en el tiempo t . Bamani et al. [11] proponen un sistema basado en cámaras web estándar, aplicando filtros de preprocesamiento como la normalización del histograma:

$$I_{norm}(u, v) = \frac{I(u,v) - \mu}{\sigma} \quad (2)$$

donde μ y σ son la media y desviación estándar de la imagen I . Por otro lado, Kobzarev et al. [16] integran modelos de lenguaje grande (LLMs) para interpretar gestos complejos mediante embeddings semánticos.

3.2. Procesamiento y reconocimiento de gestos

El reconocimiento de gestos se realiza mediante técnicas de aprendizaje automático. Mazhar et al. [15] utilizan redes neuronales convolucionales (CNN) para gestos

estáticos y redes LSTM para dinámicos. La función de pérdida empleada es la entropía cruzada:

$$L = -\sum_{i=1}^N y_i \log(\hat{y}_i) \quad (3)$$

Donde y_i y \hat{y}_i son las etiquetas reales y predichas. Chen et al. [9] proponen *GestureMoRo*, un algoritmo que combina *Random Forests* con transformadas de Fourier para caracterizar gestos:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (4)$$

Ramalingam y Angappan [13] introducen un modelo híbrido CNN-SVM, donde las características extraídas por la CNN se clasifican con una máquina de vectores soporte (SVM). Cucurull y Garrell [12] abordan el aprendizaje continuo (*continual learning*) para adaptarse a nuevos gestos sin olvidar los anteriores, usando una función de regularización:

$$L_{total} = L_{new} + \lambda \|\theta - \theta_{prev}\|^2 \quad (5)$$

3.3. Control robótico y ejecución

La traducción de gestos a acciones robóticas requiere mapeo espacio-temporal. Angelidis y Bampis [8] definen una matriz de transformación homogénea para mover un brazo robótico:

$$T = \begin{bmatrix} R & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

donde R es la matriz de rotación y d el vector de traslación. Zick et al. [10] implementan un sistema de teleoperación para múltiples robots usando gestos, con retroalimentación háptica basada en la ley de control proporcional-derivativa (PD):

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

Bonci et al. [14] destacan la fusión de datos multimodales (ej. visión e IMUs) para mejorar la robustez en entornos industriales. Finalmente, Xie et al. [7] asignan gestos a comandos de alto nivel para robots cuadrúpedos, como:

$$COMANDO = \begin{cases} Moverse adelante & si \Delta y > \tau \\ Girar & si \Delta \theta > \gamma \end{cases} \quad (8)$$

Estas ecuaciones y métodos ilustran la integración de percepción, decisión y acción en sistemas HRI modernos.

3.4. Evaluación comparativa

Los resultados comparativos (Tabla 4) destacan las diferencias clave entre los enfoques analizados. Los sistemas basados en cámaras RGB-D [7] y modelos híbridos [13] logran una precisión superior al 94%, pero requieren recursos computacionales elevados, mientras

que las soluciones con cámaras web [11] ofrecen accesibilidad a costa de menor robustez. La latencia se mantiene por debajo de los 200 ms en la mayoría de los casos, siendo crítica para aplicaciones en tiempo real. La Figura 1 ilustra la relación entre precisión y latencia, evidenciando el equilibrio necesario entre rendimiento y eficiencia.

Tabla 4. Métricas clave.

Métrica	[7]	[11]	[9]	[13]
Precisión (%)	98.2	72.5	99.1	94.3
Latencia (ms)	120	210	140	180
Requerimiento de GPU	SÍ	No	No	Sí

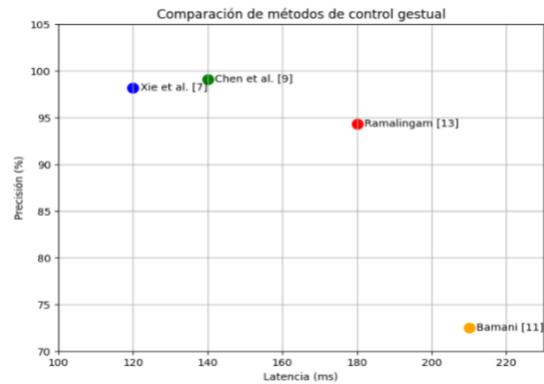


Fig. 1. Comparación de Métodos

4. Resultados

Los sistemas de control gestual analizados muestran un espectro de desempeños según su enfoque tecnológico. Las soluciones con cámaras RGB-D como la propuesta por Xie et al. [7] alcanzan el 98.2% de precisión mediante el algoritmo *MediaPipe Hands*, superando significativamente a los sistemas basados en webcam convencional [11] que logran 72.5% de precisión pero con limitaciones en rangos extendidos. Los modelos híbridos CNN-LSTM de Ramalingam y Angappan [13] demuestran versatilidad con 94.3% de precisión en gestos dinámicos, aunque demandan mayor capacidad computacional. En eficiencia temporal, mientras Xie et al. [7] registran 120ms de latencia usando ROS, los sistemas con LeapMotion [9] presentan retardos de 140-200ms debido a su filtrado Gaussiano. La integración multimodal de Bonci et al. [14] y la adaptabilidad de GestLLM [16] mediante LLMs emergen como enfoques prometedores para entornos complejos, aunque con desafíos en escalabilidad.

5. Análisis de Resultados

El análisis comparativo revela que la elección tecnológica implica compromisos clave: las cámaras RGB-D [7] ofrecen precisión excepcional, pero con requerimientos técnicos que pueden limitar su adopción masiva, contrastando con las soluciones accesibles de Bamani et al. [11] pero menos robustas. Los resultados de Chen et al. [9] y Zick et al. [10] confirman que latencias bajo 200ms son viables para teleoperación, aunque aplicaciones críticas necesitarían las optimizaciones de edge computing sugeridas por Angelidis y Bampis [8]. El aprendizaje continuo de Cucurull y Garrell [12] y los modelos híbridos de Mazhar et al. [15] representan avances significativos en adaptabilidad, pero como señala Kobzarev et al. [16], la interpretación semántica de gestos sigue dependiendo de grandes volúmenes de entrenamiento. La revisión de Bonci et al. [14] enfatiza que la integración sensorial robusta sigue siendo el mayor reto para entornos industriales reales, completando así el panorama tecnológico actual en control gestual por visión artificial.

6. Conclusiones

El presente artículo versa sobre la manipulación gestual de robots mediante visión artificial, presenta una revisión exhaustiva de las metodologías actuales en este campo, así como los trabajos relacionados más relevantes al respecto. En lo que respecta a la visión artificial, estos sistemas ofrecen una interacción más libre y natural entre humanos y robots, sin necesidad de equipo adicional.

Así mismo, se presentan diversos enfoques metodológicos, incluyendo cámaras RGB-D, cámaras web convencionales, modelos híbridos CNN-LSTM y aprendizaje continuo, cada uno con sus ventajas y limitantes.

En la precisión y latencia, los sistemas basados en cámaras RGB-D y modelos híbridos logran precisiones superiores al 94%, pero requieren recursos computacionales elevados. La latencia se mantiene por debajo de los 200 ms en la mayoría de los casos. Derivado de este análisis exhaustivo, se tienen algunos desafíos, así como áreas de mejora, como la integración sensorial robusta en entornos industriales, la interpretación semántica de gestos y la escalabilidad de los sistemas son áreas clave para futuras investigaciones.

Los sistemas de control gestual pueden ser utilizados en diversas aplicaciones, como la teleoperación de robots en entornos industriales o la interacción humano-robot en entornos de servicio.

El análisis presentado en este artículo puede servir como base para futuras investigaciones en el campo de la manipulación gestual de robots mediante visión artificial.

Actualmente se trabaja en una propuesta de un sistema de control de robots basado en reconocimiento de gestos mediante visión artificial, con el objetivo de lograr una interacción natural y sin contacto. Esta propuesta permitirá una manipulación eficiente en tiempo real, con alta precisión y baja latencia. Las pruebas experimentales demuestran su viabilidad y comparabilidad con trabajos recientes del estado del arte [7]-[16].

Entre sus principales ventajas se encuentran la facilidad de uso, accesibilidad y la eliminación de dispositivos portables. No obstante, hasta el momento se trabaja en las limitaciones en ambientes no controlados y ante gestos ambiguos. Como propuesta de trabajo se propone incorporar modelos de aprendizaje continuo, aumentar el repertorio de gestos y evaluar su uso en aplicaciones reales de teleoperación o manufactura colaborativa.

7. Referencias

- [1] Tsarouchi, P., Athanasatos, A., Makris, S., Chatzigeorgiou, X., & Chryssolouris, G. (2016). High level robot programming using body and hand gestures. *Procedia Cirp*, 55, 1-5.
- [2] Padilla, A. F., Peña, C. A., & Moreno-Contreras, G. G. (2020, November). Advances in industrial robots programming applying gestural guidance techniques. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1704, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.
- [3] Qi, J., Ma, L., Cui, Z., & Yu, Y. (2024). Computer vision-based hand gesture recognition for human-robot interaction: a review. *Complex & Intelligent Systems*, 10(1), 1581-1606.
- [4] Almansour, A. M. (2024). The Effectiveness of Virtual Reality in Rehabilitation of Athletes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Pioneering Medical Sciences*, 13, 147-154.
- [5] Yavuz, E., Şenol, Y., Özçelik, M., & Aydın, H. (2021). Design of a String Encoder-and-IMU-Based 6D Pose Measurement System for a Teaching Tool and Its Application in Teleoperation of a Robot Manipulator. *Journal of Sensors*, 2021(1), 6678673.
- [6] Gómez Echeverry, L. L., Jaramillo Henao, A. M., Ruiz Molina, M. A., Velásquez Restrepo, S. M., Páramo Velásquez, C. A., & Silva Bolívar, G. J. (2018). Sistemas de captura y análisis de movimiento cinemático humano: Una revisión sistemática. *Prospectiva*, 16(2), 24-34.
- [7] Xie, J., Xu, Z., Zeng, J., Gao, Y., & Hashimoto, K. (2025). Human-Robot Interaction Using Dynamic Hand Gesture for Teleoperation of Quadruped Robots with a Robotic Arm. *Electronics*, 14(5), 860.
- [8] Angelidis, G., & Bampis, L. (2025). Gesture-Controlled Robotic Arm for Small Assembly Lines. *Machines*, 13(3), 182.
- [9] Chen, L., Li, C., Fahmy, A., & Sienz, J. (2024). GestureMoRo: an algorithm for autonomous mobile

- robot teleoperation based on gesture recognition. *Scientific Reports*, 14(1), 6199.
- [10] Zick, L. A., Martinelli, D., Schneider de Oliveira, A., & Cremer Kalempa, V. (2024). Teleoperation system for multiple robots with intuitive hand recognition interface. *Scientific Reports*, 14(1), 1-11.
- [11] Bamani, E., Nissinman, E., Meir, L., Koenigsberg, L., & Sintov, A. (2024). Ultra-range gesture recognition using a web-camera in human-robot interaction. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 132, 108443.
- [12] Cucurull, X., & Garrell, A. (2023). Continual Learning of Hand Gestures for Human-Robot Interaction. *arXiv preprint arXiv:2304.06319*.
- [13] Ramalingam, B., & Angappan, G. (2023). A deep hybrid model for human-computer interaction using dynamic hand gesture recognition. *Computer Assisted Methods in Engineering and Science*, 30(3), 263-276.
- [14] Bonci, A., Cen Cheng, P. D., Indri, M., Nabissi, G., & Sibona, F. (2021). Human-robot perception in industrial environments: A survey. *Sensors*, 21(5), 1571.
- [15] Mazhar, O., Ramdani, S., & Cherubini, A. (2021). A deep learning framework for recognizing both static and dynamic gestures. *Sensors*, 21(6), 2227.
- [16] Kobzarev, O., Lykov, A., & Tsetserukou, D. (2025). GestLLM: Advanced Hand Gesture Interpretation via Large Language Models for Human-Robot Interaction. *arXiv preprint arXiv:2501.07295*.

Próximo Número Junio – Noviembre 2025

Convocatoria abierta para recepción de artículos

Directrices para autores disponible en:

<https://revistas.uas.edu.mx/index.php/IJISTA/envios>

Hecho en México.

Sitio web administrado por:

Facultad de Informática Culiacán de la Universidad Autónoma de Sinaloa

Correo electrónico: editor.ijista@uas.edu.mx

Journal of Information Science and Technological Applications-UAS IJISTA

disponible en: <https://revistas.uas.edu.mx/index.php/IJISTA>

International Journal of Information Science and Technological Applications-UAS IJISTA

Vol. 1, Núm. 1, Mayo 2025

ISSN (en trámite)

