CENDITEL
NODO MÉRIDA

clic

CONOCIMIENTO LIBRE Y LICENCIAMIENTO

2026
Nro. 34 Año 17
ISSN No. 2244-7423









Conocimiento Científico, Tecnológico y Humanístico

Revista Conocimiento Libre y Licenciamiento (CLIC)

Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL), ente adscrito al Ministerio del Poder Popular para Ciencia y Tecnología (MINCYT)
Dirección: Avenida Alberto Carnevali, vía La Hechicera, Edificio CENDITEL. Mérida-Venezuela.
Teléfono: +58 (0274) 6574336
Correo electrónico: convite@cenditel.gob.ve
Página web: https://convite.cenditel.gob.ve/publicaciones/revistaclic/
Deposito Legal No. PPI 201002ME3476
ISSN No. 2244-7423

La Revista Conocimiento Libre y Licenciamiento (CLIC) se encuentra en los siguientes directorios, bases de datos e índices:

Los contenidos de esta publicación expresan el punto de vista académico y científico de los autores, quienes son los únicos responsables de sus escritos y son divulgados con el propósito de generar el debate en torno al conocimiento libre. De ningún modo debe entenderse que los mismos representan necesariamente la política oficial del Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL) ni del Ministerio del Poder Popular para Ciencia y Tecnología (MINCYT).

Todos los documentos publicados en la Revista CLIC número 34, se distribuyen bajo la Licencia Creative Commons Atribución – No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0). Usted puede copiar, distribuir y comunicar este contenido, siempre que se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se comparta bajo la misma licencia que la obra original.

Equipo Editorial

Directora de Investigación
Dra. María Rujano — Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres, Venezuela

Editor
Dr. Santiago Roca — Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres, Venezuela

Comité Editorial

Dr. Tulio Carrillo	Universidad Politécnica Territorial de Mérida Kleber Ramírez, Venezuela
Dra. Deisy Hernández	Universidad Metropolitana, Venezuela
Dr. Raúl Isea	Fundación Instituto de Estudios Avanzados, Venezuela
Dr. Alejandro Ochoa	Universidad Austral de Chile, Chile
Dra. Karina Peña	Universidad de Los Andes, Venezuela
Dr. Francisco Pérez	Universidad de Sancti Spíritus José Martí Pérez, Cuba
Dra. Lisbeth Rengifo	Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional Bolivariana, Venezuela
Dr. Tanger Rivas	Universidad de Los Andes, Venezuela
Dra. Caribay Urbina	Universidad Central de Venezuela, Venezuela
MSc. Juan Pablo López	Universidad Politécnica Estatal del Carchi, Ecuador
MSc. Maritza Méndez	Universidad Politécnica Estatal del Carchi, Ecuador

Comité Científico Asesor

Dr. David Bastardo	Fundación Instituto de Estudios Avanzados, Venezuela
Dr. Ebert Cardoza	Universidad de Los Andes, Venezuela
Dr. José Colina	Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Venezuela
Dr. Magín González	Tecnológico Nacional de México, México
Dra. Yelitza Maurielo	Ministerio del Poder Popular para la Educación Universitaria, Venezuela
Dra. Yenifer Medina	Universidad Politécnica Territorial de Falcón Alonso Gamero, Venezuela
Dr. Luis Molina	Universidad Politécnica Territorial de Mérida Kleber Ramírez, Venezuela
Dra. Mónica Pérez	Universidad Politécnica Territorial de Mérida Kleber Ramírez, Venezuela
Dra. Keila Piñero	Ministerio del Poder Popular para la Educación Universitaria, Venezuela
Dr. José Puentes	Universidad de Los Andes, Venezuela
Dr. Wilmer Velásquez	Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Honduras
MSc. Ángel Alvarado	Universidad Central de Venezuela, Venezuela
MSc. Yohan Godoy	Centro Regional de Investigación en Ciencias, su Enseñanza y Filosofía, Venezuela
MSc. Marlitt Guilarte	Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales, Venezuela
MSc. Antonio Monsalve	Universidad Simón Bolívar, Venezuela
MSc. Yorman Peraza	Universidad de Carabobo, Venezuela
MSc. Miryan Pinzón	Universidad Politécnica Territorial de Mérida Kleber Ramírez, Venezuela
MSc. Hermin Sosa	Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales, Venezuela
Ing. Kerlyn Lugo	Universidad de Carabobo, Venezuela
Lic. Edison Miguez	Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador
Lic. Janeth Pavique	Ministerio del Poder Popular para la Educación Universitaria, Venezuela

Equipo Editorial

Dr. Daniel Quintero	Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres, Venezuela
Dra. María Acosta	Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres, Venezuela
Dra. Yazmary Rondón	Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres, Venezuela
MSc. Carlos González	Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres, Venezuela
MSc. Jesús Erazo	Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres, Venezuela
MSc. Gloria Rondón	Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres, Venezuela
MSc. Aida Andrade	Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres, Venezuela
Ing. Pablo Sulbarán	Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres, Venezuela
Ing. Richard Rodríguez	Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres, Venezuela

Diseño de portada y secciones

Arq. Gabriel Martínez — Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres, Venezuela

Revista Conocimiento Libre y Licenciamiento (CLIC) No. 34 Año 17 (2026)
https://convite.cenditel.gob.ve/publicaciones/revistaclic/
Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres – CENDITEL https://www.cenditel.gob.ve/

República Bolivariana de Venezuela

Índice general

Presentación I
Editorial III

Artículos sobre la Creación de Conocimiento

Análisis del cambio del uso de tierra en la cuenca del río Pao (Venezuela) mediante imágenes Landsat
Mairim Márquez, Adriana Márquez, Bettys Farías, Edilberto Guevara y Sergio Pérez 2

Desarrollo de un mecanismo de ensayos mecánicos para determinar deformaciones en materiales mediante galgas extensiométricas
Jesús Araque, Miguel Palmera, José Materán, Ana Velaquéz y Miguel Contreras 39

Gale, una biblioteca de Python para enseñar programación de videojuegos
Alejandro Mujica, Jesús Pérez, Daniella Zambrano y José Farías 55

Asistente robótico de medicación con dispensación automatizada e interfaz multisensorial
Laura Carrillo, Juan González, Nicole Parra, Andrés Rodríguez y Hernán Ramírez 76

Confianza organizacional y adopción ágil en el sector público: Caso Trolebús Mérida
Ariadn Carrasquero, Verónica Ordoñez, Ana Velásquez, Massiel Poleo y Anderson Ramírez 92

Ensayos sobre la Creación de Conocimiento

Estrategias en nanomedicina para el uso de especies reactivas de oxígeno
Franklin Vargas, Miguel León, Johany Velásquez, Alexis Maldonado y Mariangel Contreras 114

La metamorfosis capitalista: Infraestructura digital, debate teórico e impacto socioambiental
Lena Sánchez 125

Ciberseguridad y desarrollo nacional en Venezuela: Capacidades, vulnerabilidades y condiciones institucionales
Dennis Chirinos 145

Dialógica del Cosmos: Orden y caos en la génesis del Sistema Solar
Giuliat Navas y Walter Espinoza 162

Los siete saberes de Morin ante la pérdida de la identidad patrimonial arquitectónica
Gabriel Martínez y Mónica Pérez 177

Experiencias de Tecnologías Libres

KAVAC: Sistema de código abierto para la gestión integral de recursos organizacionales

Roldan Vargas 195

Arquitecturas de seguridad IoT: Control de acceso, vigilancia y trazabilidad con código abierto

María Paola Urbina y Hernán Ramírez 205

Experiencias de Conocimiento Libre

Historia y tradiciones del café, desde la práctica del agricultor como docente

Jorge Durán 220

Reseña

Justicia artificial

María Alejandra Lacruz y Manuel Morocoima 231

Boletín

Venezuela avanza en cooperación científica, innovación y tecnologías libres

María Eugenia Acosta 236

ISSN: 2244-7423

Presentación

El arbitraje científico como acto de responsabilidad y compromiso académico

Suele pensarse que la innovación científica y tecnológica responde únicamente a la evolución de los instrumentos y las herramientas informáticas. Sin embargo, la construcción y la apropiación social del conocimiento dependen de publicaciones respaldadas por una red de especialistas que colaboran de manera voluntaria como revisores en las revistas académicas. Sin el trabajo de los pares evaluadores no sería posible examinar las investigaciones con el rigor adecuado ni enriquecer el acervo científico y técnico mundial. A pesar de su relevancia, la revisión académica suele ser una labor poco reconocida tanto en los entornos profesionales como en los editoriales.

En la actualidad, la gestión de publicaciones utiliza medios técnicos cada vez más sofisticados. Un ejemplo es *Open Journal Systems*, plataforma de código abierto que da soporte a las distintas etapas del proceso editorial y que se nutre del trabajo continuo de sus desarrolladores. De manera similar, los evaluadores de las revistas científicas aportan visión crítica, conocimientos especializados y criterios éticos a la revisión de los productos de investigación. Aunque existen diversas herramientas digitales para agilizar la gestión editorial, solo el arbitraje académico garantiza que el conocimiento se valide con criterio y responsabilidad humana.

Esta labor, además, enfrenta múltiples presiones. El incremento en el volumen de publicaciones y el fortalecimiento de la infraestructura digital hacen indispensable incorporar a más profesionales en los circuitos de evaluación. A esto se suma el auge de tecnologías como la inteligencia artificial generativa, que exige una mirada aguda ante las nuevas amenazas a la ética científica. Al mismo tiempo, los árbitros deben equilibrar la docencia, la investigación y la revisión de manuscritos, una tarea que a menudo reposa solo en su buena voluntad. Por ello, resulta imperativo visibilizar su trabajo mediante mecanismos formales, tales como la emisión de certificados, la vinculación a perfiles académicos (como ORCID) y la inclusión del arbitraje en los procesos de acreditación institucional.

En síntesis, el conocimiento científico es un bien público derivado de la transformación de manuscritos en artículos arbitrados mediante procesos como el sistema de doble ciego. Además, el modelo de Ciencia Abierta depende directamente de esta forma de colaboración, la cual impulsa la democratización del saber y la expansión de sus fronteras. En este sentido, el evaluador debe concebirse como un pilar fundamental de los sistemas de evaluación científica y no como un simple ejecutor que se desenvuelve a la sombra del rigor metodológico. Reconocer su labor es una responsabilidad fundamental tanto de los centros editoriales como de las instituciones académicas.

Para preservar la calidad de la ciencia es necesario respaldar activamente a las comunidades de pares evaluadores y hacer visible su contribución al ecosistema científico global. Por esta razón, aprovechamos esta oportunidad para expresar nuestro sincero reconocimiento a las evaluadoras y los evaluadores de la *Revista Conocimiento Libre y Licenciamiento*, integrados en el Comité Científico Asesor de cada número, quienes con su trabajo riguroso hacen posible la misión de concebir el saber como un bien común al servicio de la humanidad.

Santiago Roca
Equipo Editorial
DOI: 10.5281/zenodo.23806873

ISSN: 2244-7423

Editorial

En la edición 34 de la Revista Conocimiento Libre y Licenciamiento (CLIC) asumimos la Ciencia Abierta no solo como un modelo de publicación, sino como un compromiso ético con la democratización del saber. Entendemos que abrir el conocimiento, a través del acceso libre, la transparencia en los datos de investigación y la colaboración interdisciplinaria, es fundamental para responder con rigor y pertinencia a las transformaciones sociales y tecnológicas de nuestro país.

Esta premisa se materializa con la entrega de contribuciones que abordan problemáticas territoriales y socioambientales de gran alcance. La sección "Artículos sobre la Creación de Conocimiento" inicia con *Análisis del cambio del uso de tierra en la cuenca del río Pao (Venezuela) mediante imágenes Landsat*, de Mairim Márquez, Adriana Márquez, Bettys Farías, Edilberto Guevara y Sergio Pérez, quienes utilizaron métodos de postclasificación y preclasificación para registrar variaciones en la cobertura terrestre y usos de la tierra en dicha zona. En el artículo *Desarrollo de un mecanismo de ensayos mecánicos para determinar deformaciones en materiales mediante galgas extensiométricas*, los autores Jesús Araque, Miguel Palmera, José Materán, Ana Velásquez y Miguel Contreras, diseñaron y validaron experimentalmente un prototipo para medir deformaciones en aceros ASTM A36 mediante modelado CAD y simulaciones en ANSYS.

Más adelante, en *Gale, una biblioteca de Python para enseñar programación de videojuegos*, los investigadores Alejandro Mujica, Jesús Pérez, Daniella Zambrano y José Farías, realizaron un estudio documental de la biblioteca de código abierto Gale (Pygame) utilizada como herramienta pedagógica en la asignatura de Programación de Videojuegos de la Universidad de Los Andes. Asimismo, en *Asistente robótico de medicación con dispensación automatizada e interfaz multisensorial*, Laura Carrillo, Juan González, Nicole Parra, Andrés Rodríguez y Hernán Ramírez, desarrollaron un asistente robótico para mitigar la falta de adherencia terapéutica, cuyas pruebas técnicas demostraron que es viable integrar hardware abierto y código libre para la dispensación domiciliaria. Para cerrar, el estudio sobre *Confianza organizacional y adopción ágil en el sector público: Caso Trolebús Mérida*, de Ariadn Carrasquero, Verónica Ordoñez, Ana Velásquez, Massiel Poleo y Anderson Ramírez, analiza cómo la construcción progresiva de confianza organizacional favoreció la transición hacia prácticas ágiles en el equipo de TI de Tromerca, reduciendo la incertidumbre y permitiendo delegar decisiones técnicas.

En "Ensayos sobre la Creación de Conocimiento", se presenta *Estrategias en nanomedicina para el uso de especies reactivas de oxígeno*, donde Franklin Vargas, Miguel León, Johany Velásquez, Alexis Maldonado y Mariangel Contreras, realizaron una revisión bibliográfica sobre el uso de especies reactivas del oxígeno (ERO) en nanomedicina, destacando su potencial terapéutico en oncología, liberación de fármacos y control de la inflamación. Seguidamente,

la autora Lena Sánchez presenta *La metamorfosis capitalista: Infraestructura digital, debate teórico e impacto socioambiental*, donde examina cómo la digitalidad, la datificación y la automatización algorítmica han configurado un régimen capitalista de concentración de poder basado en la monopolización de plataformas e infraestructura. En *Ciberseguridad y desarrollo nacional en Venezuela: Capacidades, vulnerabilidades y condiciones institucionales*, la investigadora Dennis Chirinos analiza la relación entre la ciberseguridad y el desarrollo nacional en Venezuela, destacando la brecha entre la digitalización y su protección. A continuación, Giuliat Navas y Walter Espinoza presentan *Dialógica del Cosmos: Orden y caos en la génesis del Sistema Solar*, en el cual interpretan la formación y evolución del Sistema Solar desde el pensamiento complejo de Edgar Morin, oponiéndose al reduccionismo científico tradicional. Finalmente, en *Los Siete Saberes de Morín ante la pérdida de la identidad patrimonial arquitectónica*, los autores Gabriel Martínez y Mónica Pérez analizan la pérdida de identidad patrimonial en un caso específico y señalan que el deterioro del inmueble obedece a una crisis epistémica, antropológica y ética.

Las "Experiencias de Tecnologías Libres" presentan *KAVAC: Sistema de código abierto para la gestión integral de recursos organizacionales*, donde el autor Roldan Vargas describe el origen, la evolución técnica y la arquitectura del sistema, y analiza los desafíos técnicos superados al implementar esta solución orientada a la automatización institucional del sector público. De igual manera, María Paola Urbina y José Ramírez exponen *Arquitecturas de seguridad IoT: Control de acceso, vigilancia y trazabilidad con código abierto*, donde utilizando la metodología de Ciencia del Diseño, desarrollaron un artefacto multicapa con microcontroladores ESP32 y un orquestador central que, tras pruebas empíricas, permitió migrar a modelos de aplicación asíncronos.

En "Experiencias de Conocimiento Libre", el investigador Jorge Durán presenta el trabajo *Historia y tradiciones del café, desde la práctica del agricultor como docente*, en el cual analiza la figura del docente-caficultor en Canaguá, Mérida, como un mediador empírico que utiliza el sistema socioproductivo del café como un currículo vivo, y sostiene que integrar el saber del caficultor fomenta la identidad cultural local, la conservación ambiental y la dignificación de la ruralidad en los Andes venezolanos.

La Reseña, a cargo de María Alejandra Lacruz y Manuel Morocoima, describe el filme *Justicia artificial* de Simón Casal (2024), que aborda el conflicto desatado en España por un referéndum para implementar THENTE 2, un sistema de IA diseñado para automatizar y agilizar las decisiones judiciales, y plantea una reflexión ética extrapolable a cualquier institución que delegue la toma de decisiones críticas en sistemas automatizados. Para cerrar esta edición, el Boletín titulado *Venezuela avanza en cooperación científica, innovación y tecnologías libres*, de María Eugenia Acosta, describe que la actividad científica y tecnológica en el país avanza vinculando la cooperación institucional, la formación y las necesidades sociales, y que el MINCYT y sus entes impulsaron en este segundo semestre encuentros, programas

educativos, recuperación de infraestructura y apropiación de tecnologías libres.

La Revista Conocimiento Libre y Licenciamiento (CLIC) reafirma su compromiso con el conocimiento libre, la soberanía tecnológica y el desarrollo humano, consolidando un espacio donde la ciencia, la innovación y el trabajo colectivo de las comunidades e instituciones se traducen en respuestas concretas para Venezuela. Con este recorrido por saberes, experiencias y reflexiones críticas, invitamos a nuestros lectores a seguir construyendo colectivamente una ciencia para la vida.

María Alejandra Rujano
Equipo Editorial
DOI: 10.5281/zenodo.23807031

Artículos sobre la Creación de Conocimiento

CONOCIMIENTO LIBRE Y LICENCIAMIENTO

Análisis del cambio del uso de tierra en la cuenca del río Pao (Venezuela) mediante imágenes Landsat

Análise da mudança no uso da terra na bacia do rio Pao (Venezuela) por meio de imagens Landsat

Analysis of land-use change in the Pao River basin (Venezuela) using Landsat imagery

Mairim Márquez [1]
Adriana Márquez [2]
Bettys Farías [3]
Edilberto Guevara [4]
Sergio Pérez [5]
Universidad de Carabobo, Carabobo, Venezuela[1,2,3,4,5]
mmarquer@uc.edu.ve[1]
ammarquez@uc.edu.ve[2]
bfarias@uc.edu.ve[3]
eguevara@uc.edu.ve[4]
sperez@uc.edu.ve[5]

Fecha de recepción: 01/07/2024
Fecha de aceptación: 10/08/2026
Pág: 2 – 38
DOI: 10.5281/zenodo.23809850

Resumen

En esta investigación, se aplicaron técnicas de detección de cambios en el uso y la cobertura del suelo en la cuenca del río Pao. La cuenca está ubicada en la región centro-norte de la República Bolivariana de Venezuela. Se adquirieron once imágenes satelitales Landsat: L5 TM, L7 ETM, L8 OLI. Las técnicas de detección de cambios fueron: postclasificación y preclasificación. Estas se aplicaron a imágenes de dos fechas: 1986-2016; 1990-2016; 1991-2016, 1998-2016, 1999-2016, 2000-2016, 2001-2016, 2002-2016, 2003-2016, 2015-2016. Se aplicaron siete métodos de preclasificación.

Esta obra está bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0.

Por ejemplo, en el método de postclasificación, la diferencia de área correspondiente a la cuenca del río Pao entre 1986 (fecha 1) y 2016 (fecha 2) arrojó los siguientes resultados sobre las clases: Urbano: -1.37 %, Pastizales: -22.9 %, Agrícola: 1.12 %, Agua: 0.55 %, Vegetación: 8.1 %, Tierras degradadas: 9.66 %, Nubes: 2.49 %, Sombras: 2.28 %. El método de postclasificación ha sido la opción predominante con respecto al método de preclasificación. La categorización de los métodos de preclasificación se obtuvo de la matriz de error y ajustando los métodos a las características locales de la escena en la imagen satelital Landsat. La categorización en orden de mayor o menor exactitud para estimar la proporción del área de cambio/no cambio en la cobertura terrestre y usos de la tierra de la cuenca del río Pao dio como resultado: 1) análisis de componentes principales 2) diferencia de imagen, 3) transformación de Kauth-Thomas, 4) vector de cambio, 5) relación de imagen, 6) diferencia de imágenes del índice de vegetación y 7) regresión de imagen.

Palabras clave: análisis espacio-temporal, imágenes satelitales, índice de vegetación, usos de la tierra, vector de cambio.

Resumo

Nesta pesquisa, foram aplicadas técnicas de detecção de mudanças no uso e na cobertura do solo na bacia do rio Pao. A bacia está localizada na região centro-norte da República Bolivariana da Venezuela. Foram adquiridas onze imagens de satélite Landsat (L5 TM, L7 ETM, L8 OLI). As técnicas de detecção de mudanças utilizadas foram: pós-classificação e pré-classificação. Elas foram aplicadas a imagens de dois períodos: 1986-2016, 1990-2016, 1991-2016, 1998-2016, 1999-2016, 2000-2016, 2001-2016, 2002-2016, 2003-2016 e 2015-2016. Foram aplicados sete métodos de pré-classificação. Por exemplo, no método de pós-classificação, a diferença de área referente à bacia do rio Pao entre 1986 (data 1) e 2016 (data 2) apresentou os seguintes resultados para as classes: Urbano: -1,37%; Pastagens: -22,9%; Agrícola: 1,12%; Água: 0,55%; Vegetação: 8,1%; Terras degradadas: 9,66%; Nuvens: 2,49%; Sombras: 2,28%. O método de pós-classificação foi a opção predominante em relação ao método de pré-classificação. A categorização dos métodos de pré-classificação foi obtida a partir da matriz de erro e do ajuste dos métodos às características locais da cena na imagem de satélite Landsat. A categorização, em ordem de maior ou menor exatidão, para estimar a proporção da área de mudança/não mudança na cobertura e no uso da terra da bacia do rio Pao resultou em: 1) análise de componentes principais, 2) diferença de imagem, 3) transformação de Kauth-Thomas, 4) vetor de mudança, 5) razão de imagens, 6)

diferença de imagens do índice de vegetação e 7) regressão de imagem.

Palavras-chave: análise espaço-temporal, imagens de satélite, índice de vegetação, uso da terra, vetor de mudança.

Abstract

In this investigation, the land use and land cover change detection techniques have been applied in the Pao river basin. The basin is located at the north-central region of the Bolivarian Republic of Venezuela. Eleven satellite images were acquired from Landsat satellite: L5 TM, L7 ETM, L8 OLI. The change detection techniques were: post-classification and pre-classification. These were applied on images from two dates: 1986-2016; 1990-2016; 1991-2016, 1998-2016, 1999-2016, 2000-2016, 2001-2016, 2002-2016, 2003-2016, 2015-2016. Seven pre-classification methods were applied. For example, in the postclassification method, the area difference corresponding to the Pao river basin between 1986 (date 1) and 2016 (date 2) yielded the following results on the classes: Urban: -1.37%, Rangeland: -22.9%, Agricultural: 1.12%, Water: 0.55%, Vegetation: 8.10%, Degraded Land: 9.66%, Clouds: 2.49%, Shadows: 2.28%. The post-classification method has been the predominant option compared to pre-classification method. The categorization of the preclassification methods was obtained from the error matrix and by adjusting the methods to the local characteristics of the scene in the Landsat satellite. The categorization in order of the more or less exact for estimating of the area proportion of change / no change in land cover and land uses from the Pao river basin gave as a result: 1) principal component analysis 2) image difference, 3) Kauth-Thomas transformation, 4) vector change, 5) Image Relation, 6) difference of images of vegetation index and 7) image regression.

Keywords: spatio-temporal analysis, satellite imagery, vegetation index, land use, change vector.

Introducción

La información de cambios de cobertura y usos de la tierra es usada en aplicaciones como deforestación, monitoreo de desastres, expansión urbana, planificación y manejo de la tierra (Hussain et al., 2013). Singh (1989) definió la detección de cambios como "el proceso de identificar diferencias en el estado de un objeto o fenómeno observándolo en momentos diferentes". Las técnicas de detección de cambios de uso y coberturas terrestres se pueden

agrupar como: pre-clasificación y post-clasificación (Chen et al., 2012).

La caracterización del uso y coberturas de la tierra, permite seleccionar los límites de la zona a cartografiar dependiendo del objetivo del estudio. Las cuencas hidrográficas son un marco espacial adecuado para el estudio de los ecosistemas. Las cuencas son una unidad productora de agua para satisfacer usos naturales y antrópicos (Guevara y Cartaya, 1991). En forma independiente o interconectada con otras, las cuencas son excelentes unidades para el manejo integrado de los bienes y servicios, proveyendo a los ecosistemas que se ven alterados cuando se modifica el uso/cubertura de la tierra.

En los últimos años los sensores a bordo de satélites se han convertido en la herramienta ideal para caracterizar el uso/cobertura del suelo sobre grandes extensiones de territorio (Townshend et al., 1985). Las imágenes generadas por estos sensores proveen datos cualitativos y espacialmente continuos de la superficie, resultando así particularmente útiles para describir el uso de la tierra en grandes extensiones. La discriminación de tipos de cobertura (cultivos de verano, de invierno, montes forestales, cuerpos de agua, pasturas, etc.) se basa en la unicidad de su respuesta espectral y en los cambios temporales que en ellos pudieran operar (Guerschman et al., 2003).

Recientes experiencias han implementado las técnicas de detección de cambios de usos y coberturas terrestres utilizando mayormente imágenes satelitales Landsat 8 OLI para Cuenca Baja del Río Usumacinta (Megia et al., 2025), encontrando que la clasificación no supervisada mostró limitaciones para diferenciar clases específicas como los bosques tropicales, bosques inundados y plantaciones de palma de aceite. Zaraza et al. (2022) aplicaron métodos de clasificación supervisada y no supervisada (aprendizaje profundo), usando imágenes de muy alta resolución espacial producidas por PlanetScope para la mina Cerrejón en Colombia, obteniendo mejores aproximaciones con los métodos de clasificación no supervisada.

En general, los métodos de detección de cambios de usos y coberturas en cuencas para períodos de hasta 30 años han encontrado incrementos en usos residenciales y agrícolas, así como disminuciones en las coberturas terrestres (López et al., 2020; Tadese et al., 2020; Tewabe y Fentahun, 2020). Las predicciones de cambios en usos y coberturas terrestres en cuencas para tiempos futuros, por ejemplo 2030, se han basado en la aplicación de métodos basados en modelos de series de tiempo a partir de las componentes principales obtenidas desde las diferencias de imágenes bitemporales de reflectancia superficial, cuyas predicciones en la etapa de validación han arrojado un coeficiente de correlación superior a 0.8 y un coeficiente de determinación ajustado superior a 0.7 (Márquez et al., 2019). Otros métodos de pronóstico de cambios en uso y coberturas terrestres en cuencas han implicado la implementación de enfoques de aprendizaje automático, produciendo escenarios para En 2035, obteniendo una expansión significativa de las tierras de cultivo y las zonas urbanas a expensas de las zonas forestales, de pastos y de matorrales (Obodai et al., 2019; Roy y Inamdar, 2019; Shawul y

Chakma, 2019; Twisa y Buchroithner, 2019).

Esta investigación ha tenido como propósito realizar una caracterización espacio-temporal de los procesos dinámicos de cambios en el uso y cobertura terrestres, utilizando datos satelitales provenientes de sensores Landsat L5 TM/L7 ETM /L8 OLI; entre los periodos 1986-2016; 1990-2016; 2000-2016. Se aplican como técnicas de detección de cambios post-clasificación y preclasificación.

Región de estudio

La cuenca del río Pao está ubicada en la región centro-norte de la República Bolivariana de Venezuela adjunta al Mar Caribe. La cuenca Pao posee un área total de 3.019 km^2. La cuenca Pao incluye catorce ríos principales y tres embalses (Figura 1). Estos cuerpos acuáticos proporcionan agua para el desarrollo de los usos de la tierra en tres estados de la región norte del país, cuya población urbana es la siguiente: 1) Cojedes (265.541 habitantes), 2) Carabobo (2.208.188 habitantes) y 3) Aragua (1.557.151 habitantes). La cobertura de la tierra / uso de la tierra es categorizada con el Sistema de Clasificación de la Tierra del US Geological Survey (USGS) para el uso con datos de sensores remotos mediante cinco principalmente: 1) urbano, 2) agrícola, 3) agropecuario, 4) bosque y 5) agua (Anderson et al., 1976).

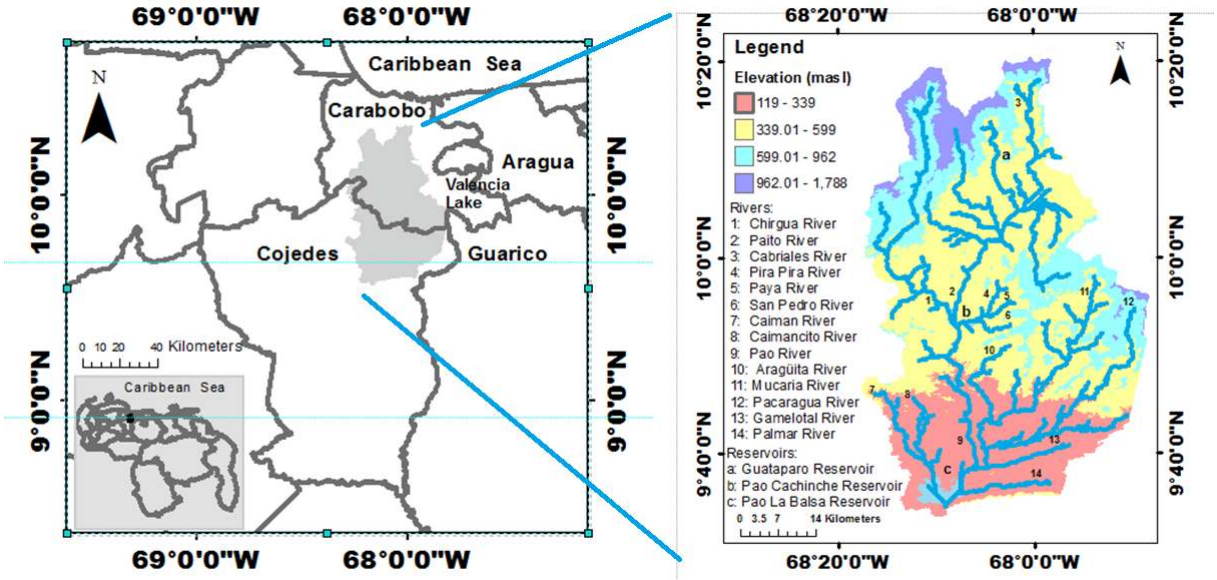


Figura 1: Ubicación geográfica de la cuenca del río Pao en la región espectral Centro-Norte de la República Bolivariana de Venezuela.

Fuente: Elaboración propia (2026).

Materiales y métodos

En esta sección se describen las siguientes etapas: En la primera etapa, son descritos los procedimientos para la adquisición de imágenes satelitales y sus características; así como las imágenes de referencias de usos y coberturas terrestres en la cuenca del río Pao. Las imágenes de referencias permiten justificar las clases siendo asignadas. En la segunda etapa, se describe el procesamiento preliminar de las imágenes de satélite mediante las correcciones absolutas y relativas. En la tercera etapa, se describe la aplicación de las técnicas para detección de cambios: 1) Postclasificación y 2) Preclasificación. En la cuarta etapa, es realizado un análisis de umbrales; basado en el ajuste de los datos a una función probabilística distribuida Normal. Los umbrales de cambio/ningún cambio, son usados en los métodos de pre-clasificación. En la quinta etapa, es realizada la comparación de los resultados de los métodos para detección de cambios.

Adquisición de datos de imágenes satelitales y de referencias

Once imágenes conteniendo una única escena del conjunto de satélites Landsat correspondientes a los meses de la estación seca comprendidos entre diciembre y marzo de cada año han sido adquiridas desde la página web: https://earthexplorer.usgs.gov/. La escena contuvo en su totalidad el área de la cuenca del río Pao. La serie temporal de las imágenes de los tres satélites Landsat fue agrupada como sigue (Tabla 1): 1) L5 TM (1986, 1990, 1991, 1998, 2001), 2) L7 ETM (1999, 2000, 2002, 2003) y 3) L8 OLI (2015 y 2016).

Tabla 1: Características de las imágenes de satélites Landsat utilizadas en esta investigación

N°	1	2	3	4	5	6	7
1	LT50050531986351XXX03	1986-12-17	14:11:28.3900750Z	20.0	7	134.9	42.2
2	LT50050531990010CPE03	1990-01-10	14:15:12.2020810Z	11.0	7	131.9	41.7
3	LT50050531991077CPE01	1991-03-18	14:14:04.6490630Z	28.0	7	104.5	51.3
4	LT50050531998032CPE00	1998-02-01	14:28:28.6110190Z	33.0	9	127.9	46.1
5	LT50050531999019CPE00	1999-01-19	14:31:37.3780560Z	23.0	9	132.9	45.2
6	LE70050532000014SGS01	2000-01-14	14:45:26.0198689Z	7.00	9	137.5	47.2
7	LT50050532001008AAA02	2001-01-08	14:32:22.5760750Z	10.0	9	135.8	44.7
8	LE70050532002051AGS00	2002-02-20	14:41:26.1414958Z	22.0	9	122.7	52.1
9	LE70050532003022PFS00	2003-01-22	14:41:05.9709036Z	10.0	9	134.0	47.1
10	LO80050532015063LGN00	2015-03-04	14:52:20.8148112Z	13.1	9	119.0	57.1
11	LC80050532016018LGN00	2016-01-18	14:52:41.9360648Z"	6.09	9	138.1	48.7

Nota: 1) identificación de la escena, 2) la fecha de adquisición 3) la hora de toma del centro de la escena, 4) la cobertura de nubes, 5) calidad de la imagen, 6) ángulo de azimuth solar y 7) el ángulo del zenit solar.

Fuente: Elaboración propia (2026).

La imagen de la cuenca del río Pao estuvo identificada bajo el Sistema de Referencia Mundial

según la ruta y fila como sigue: 005 y 053; respectivamente. Los parámetros de la proyección de mapa según el Servicio Geológico de los Estados Unidos fueron: 1) Proyección: UTM, 2) Datum: WGS1984, 3) Elipsoide: WGS84, 4) Zona UTM: 19 N, 5) Convolución cúbica. Las características de las imágenes adquiridas según cada satélite se identifican en la Tabla 1. Los datos de referencias estuvieron constituidos por imágenes de Google Earth. Las características de las imágenes y fotografías son mostradas en la Figura 2. La adquisición de las imágenes y las fotografías se basó en: fecha, coordenadas, uso y coberturas terrestres.

Procesamiento preliminar de imágenes

El procesamiento preliminar de las imágenes de los satélites Landsat involucró realizar las correcciones absolutas y relativas a cada imagen, como sigue: geométricas, radiométricas, topográficas y atmosféricas. La aplicación de los algoritmos de las correcciones sobre el conjunto de las bandas espectrales integrando la imagen requirió la composición de las bandas espectrales en cada imagen del satélite Landsat, usando la herramienta computacional ArcGIS v.10.0. Las bandas espectrales incluidas en la composición según cada satélite de la serie Landsat son como se indican en la Tabla 2.

Tabla 2: Composición de bandas espectrales de imágenes de Satélites Landsat

Landsat5 TM			**Landsat7 ETM**			**Landsat8 OLI**		
1	2	3	1	2	3	1	2	3
Unidad	μm	m	Unidad	μm	m	Unidad	μm	m
B1	0.45-0.51	30	B1	0.45-0.51	30	B1	0.45– 0.45	30
B2	0.52-0.60	30	B2	0.51-0.60	30	B2	0.45– 0.51	30
B3	0.62-0.69	30	B3	0.63-0.69	30	B3	0.53– 0.59	30
B4	0.77-0.90	30	B4	0.77-0.89	30	B4	0.64– 0.67	30
B5	1.56-1.78	30	B5	1.54-1.74	30	B5	0.85– 0.88	30
B6	10.4-12.4	30	B6	10.3-12.3	30	B6	1.57– 1.65	30
B7	2.09-2.34	30	B7	2.06-2.34	30	B7	2.11– 2.29	30

Nota: 1: Banda espectral, 2: Rango Espectral, 3: Tamaño de la celda en la malla.

Fuente: Elaboración propia (2026).

Correcciones absolutas y relativas a imágenes

En esta investigación, las imágenes han sido obtenidas en una versión corregida geométricamente desde el USGS. Las correcciones radiométricas, topográficas y atmosféricas absolutas aplicadas a cada imagen son ejecutadas en el entorno de la herramienta computacional para procesamiento de imágenes satelitales ENVI 4.7. Las correcciones relativas entre las imágenes desde los diferentes sensores del conjunto de satélites Landsat incluyen principalmente las correcciones geométricas y radiométricas. Las correcciones geométricas relativas están basadas en un procedimiento conocido como registro imagen a imagen.

Métodos de detección de cambios

Los métodos de detección de cambios aplicados en esta investigación fueron: 1) Método post-clasificación basado en la clasificación temática de dos diferentes imágenes con fechas independientes. Los mapas temáticos se compararon y analizaron posteriormente para correlacionar el tipo de cambio (Yuan et al., 2005). 2) Métodos pre-clasificación: se seleccionaron: a) Algebraicos: diferencia de imágenes, relación de imágenes, regresión de imágenes, diferencia de imágenes de índice de vegetación y vector de cambio y b) Transformación: diferencia de análisis de componentes principales, diferencia de imágenes desde el método de transformación Kauth-Thomas y sus modificaciones.



(a) 25/01/2017. Agua 10°10'45.81"N, 68°03'54"O



(b) 20/04/2017. Agua 10°10'45.81"N, 68°03'54"O



(c) 17/02/2017. Agropecuario 10°02'16.99" N, 68°24.26"O



(d) 30/12/1989. Urbano 10°14'17.89"N 68°00'35.26"O



(e) 30/12/1987. Agrícola 10°13'47.08"N, 68°11'28.18"O

(f) 17/02/2017. Suelo Degradado 10°16'0.01"N, 68°12'7.29"O

Figura 2: Imágenes de referencia desde Google Earth y fotografías de visitas de campo correspondiente a coberturas / usos de la tierra en la cuenca del río Pao.
Fuente: Elaboración propia (2026).

Determinación de umbrales para la detección de cambios

Un método comúnmente usado involucró la selección de los valores umbrales apropiados, usando la desviación estándar desde la media y probando los resultados empíricamente (Sinha y Kumar, 2013). Según Hussain et al. (2013), el/los umbral/es óptimo/s para detectar áreas de cambios y ningún cambio, se identifican mediante un método manual de ensayo y error o mediante generación y pruebas automáticas. En esta investigación, la determinación de los umbrales ha sido ejecutada en tres pasos en el entorno de trabajo ArcGIS V. 10.0: 1) Una vez aplicada la técnica de detección de cambios, la imagen resultante fue reclasificada en tres clases; incluyendo la clase de la media y clases donde los valores exceden 1 vez la desviación estándar. 2) El mapa de Cambio/Ningún Cambio fue obtenido mediante un umbral asumido como una vez la desviación estándar. 3) Las estadísticas de las zonas de Cambio/Ningún Cambio fueron estimadas mediante el uso de la herramienta Estadísticas Zonales como Tabla. Mediante esta herramienta se estimó la cantidad de píxeles y el área correspondiente donde ha sido observado Cambio/Ningún Cambio.

Comparación de resultados con técnicas convencionales

La comparación de resultados se llevó a cabo entre los dos métodos planteados: post-clasificación y pre-clasificación de imágenes de satélite bitemporales a fin de seleccionar aquel que permita cuantificar los cambios en las clases de coberturas y usos de la tierra en la cuenca del río Pao.

Resultados de la investigación

Resultados del método de postclasificación

Los resultados de la comparación postclasificación se muestran en la Figura 3; desde la 3a hasta 3j. Los resultados muestran imágenes clasificadas reflejando en forma permanente los siguientes usos: a) urbano, b) agrícola, c) agropecuario, d) agua, e) suelo degradado, f) vegetación, g) nubes, h) sombra y i) no clasificado. La evaluación de la exactitud en la clasificación de cada imagen de reflectancia es como se observa en la Tabla 3. La muestra está constituida por 512 píxeles seleccionados al azar sobre la imagen Landsat 8 OLI de 2016, en relación a los cuales, los no clasificados son 164.

Tabla 3: Matriz de error correspondiente a mapas de clasificación de usos y coberturas de la tierra basados en imágenes de reflectancia en la cuenca del río Pao desde 1986-2016.

	Uso de la Tierra	**Datos de Referencia**											
		2016											
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**Total en filas**	**Exactitud de usuario (%)**	**Kappa total**
Mapa Clasificado	1	164									164		1
	2		16	1				1			18	88.8	0.88
	3			99			1				100	99	0.98
	4				1						1	100	1
	5					4					4	100	1
	6						165				165	100	1
	7			1				56			57	98.2	0.98
	8								2		2	100	1
	9									1	1	100	1
Total en Columna		164	16	101	1	4	165	57	2	1	**512**		
Exactitud de Productor (%)			100	98.0	100	100	99.4	98.2	100	100		99.2	
Índice de Kappa Total													0.98

Nota: Las clases son: 1. No Clasificado - 2. Urbano - 3. Agropecuario - 4. Agrícola - 5. Agua - 6. Vegetación - 7. Suelo degradado - 8. Nubes - 9. Sombras.

Fuente: Elaboración propia (2026).

Los píxeles no clasificados son valores de reflectancia superficial en la región del espectro visible e infrarrojo que caen fuera de los límites de decisión del algoritmo de clasificación Máxima Probabilidad (*Maximum Likelihood*, en inglés). Según Joseph (2005), los píxeles no clasificados pueden involucrar interferencias atmosféricas, tales como nubes, sombras de nubes, neblina o humo, que tapan la reflectancia real de la superficie. En el estudio actual, se crearon clases para clasificar las principales interferencias atmosféricas como nubes y sombras de nubes, sin embargo el algoritmo de clasificación encontró 164 píxeles que podrían asociarse a tales interferencias. Según Jensen (2009), el índice de Kappa es una métrica que evalúa la concordancia temática exclusiva entre las clases definidas y la realidad de campo. En este estudio, la clasificación supervisada mediante el algoritmo Máxima Probabilidad ha sido capaz de detectar los píxeles no clasificados, arrojando un índice de Kappa de 0.98.

Los píxeles en el mapa clasificado, la exactitud de usuario y el índice Kappa son: a) Urbano: 18, 88.9 %, 0.88 b) Agropecuario: 100, 99 %, 0.98 c) Agrícola: 1,100 %,1, d) Agua: 4, 100 %, 1, e) Vegetación: 165, 100 %, 1, f) Suelo degradado: 57, 98.2 %, 0.98, g) Nubes: 2, 100 %, 1, h) Sombras: 1, 100 %.

Los píxeles en la imagen de referencia y la exactitud de productor son: a) Urbano: 16, 100 %, b) Agropecuario: 101, 98.0 %, c) Agrícola: 1,100 % d) Agua: 4, 100 %,1, e) Vegetación: 165, 99.4 %, e) Suelo degradado: 57, 98.2 %, g) Nubes: 2, 100 %, 1, h) Sombras: 1, 100 %. El índice de exactitud global es igual a 99.2 % y el índice de Kappa Total es 0.98. Los índices conduciendo a la evaluación de la exactitud de las once imágenes clasificadas correspondientes a exactitud global e índice Kappa son los siguientes: 1) 1986: 98.0 %, 0.97; 2) 1990: 99.2 %, 0.99; 3) 1991: 98.8 %, 0.98; 4) 1998: 99.0 %, 0.98; 5) 1999: 98.8 %, 0.98; 6) 2000: 99.2 %, 0.99; 7) 2001: 93 %,0.96; 8) 2002: 99.2 %, 0.99; 9) 2003: 99.3 %,0.99; 10) 2015: 99.4 %, 0.99; 11) 2016: 99.2 %, 0.99.

La diferencia bitemporal de áreas ocupadas según la clase expresada en proporción porcentual correspondiente a la cuenca del río Pao desde 1986-2016 se muestra en la Tabla 4, dónde se observan los siguientes resultados en las clases Urbano (1), Agropecuario (2), Agrícola (3), Agua (4), Vegetación (5), Suelo Degradado (6), Nubes (7), Sombras (8).

Tabla 4: Diferencia en proporción porcentual bitemporal de las áreas de cobertura y usos terrestres en la cuenca del río Pao desde 1986-2016.

Imágenes bitemporales	Urbano (1)	Agropecuario (2)	Agrícola (3)	Agua (4)	Vegetación (5)	Suelo deforestado (6)	Nube (7)	Sombra (8)
1986-2016	-1.37	-22.9	1.12	0.55	8.10	9.66	2.49	2.28
1990-2016	-1.76	-14.3	2.69	0.14	4.99	5.75	0.47	1.90
1991-2016	-1.25	-11.7	4.97	0.20	-3.70	11.5	-0.16	-0.07
1998-2016	-1.04	-2.45	0.93	0.23	-6.96	9.81	-0.55	0.04
1999-2016	-1.76	-14.3	2.69	0.14	4.99	5.75	0.47	1.90
2000-2016	-1.83	-10.5	1.26	0.54	2.25	9.48	-0.84	-0.27
2001-2016	-0.90	-5.13	4.46	0.20	0.12	0.60	-0.44	0.41
2002-2016	-0.86	-4.93	4.46	0.21	0.43	0.73	-0.44	0.41
2003-2016	-1.28	-0.27	2.78	0.10	-3.67	2.84	-0.23	-0.28
2015-2016	-0.49	3.02	-0.32	-0.15	4.17	-5.69	-0.06	-0.45

Fuente: Elaboración propia (2026).

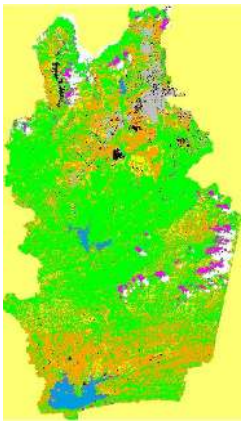
Los resultados de la proporción de áreas en los mapas obtenidos desde el método de post-clasificación en la cuenca del río Pao en cuanto a cambio/Ningún Cambio son los siguientes, como una muestra (Tabla 5): 1986-2016: Cambio: Conteo: 1 563 761; RPA: 32.6 %. Ningún Cambio: Cambio: Conteo: 3 233 594; RPA: 67.

Tabla 5: Matriz de cambio correspondiente a la proporción de áreas de Cambio/Ningún Cambio en mapas desde imágenes de reflectancia procesadas de la cuenca del río Pao desde 1986-2016.

	1986-2016		**1990-2016**		**1991-2016**		**1998-2016**		**1999-2016**	
	C	**NC**	**C**	**NC**	**C**	**NC**	**C**	**NC**	**C**	**NC**
Conteo	1563761	3233594	1312310	3482890	1437425	1777485	1309996	1904915	1235080	1979282
RPA(%)	32.6	67.4	27.3	72.6	44.7	55.2	40.7	59.2	38.4	61.5
	2000-2016		**2001-2016**		**2002-2016**		**2003-2016**		**2015-2016**	
	C	**NC**	**C**	**NC**	**C**	**NC**	**C**	**NC**	**C**	**NC**
Conteo	1183899	2031012	1334471	1880445	1 211899	2 003012	1183899	2031012	2838542	1955557
RPA(%)	36.8	63.1	41.5	58.4	37.7	62.3	36.8	63.1	59.2	40.7

Nota: Los parámetros son: C: Cambio, NC: Ningún Cambio, RPA: Relación Porcentual de Área.

Fuente: Elaboración propia (2026).



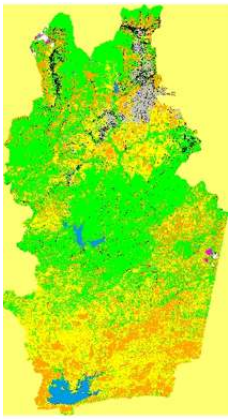
(a) 1986



(b) 1990



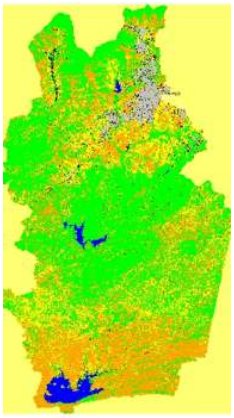
(c) 1991



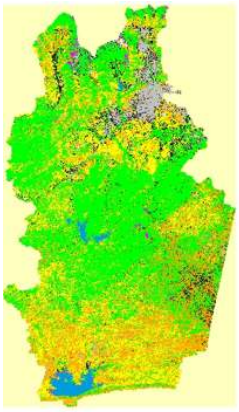
(d) 1998



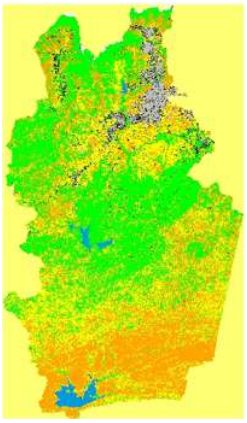
(e) 1999



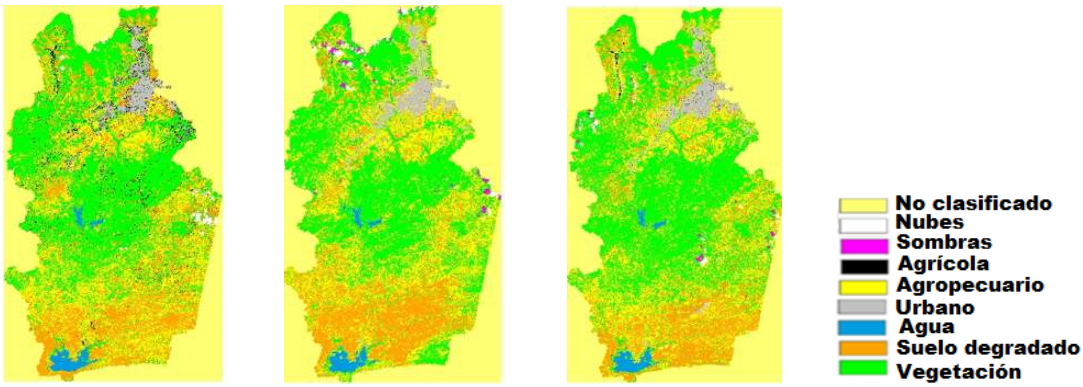
(f) 2000



(g) 2001



(h) 2002



(i) 2003 (j) 2015 (k) 2016 (l) Leyenda

Figura 3: Mapas de usos y coberturas terrestres de la cuenca del río Pao aplicado sobre imágenes de reflectancia de satélites Landsat desde 1986-2016 (continuación). a) 1986, b) 1990, c) 1991, d) 1998, e) 1999, f) 2000, g) 2001, h) 2002, i) 2003, j) 2015 y k) 2016.

Fuente: Elaboración propia (2026).

Resultados de los métodos de preclasificación: Algebraicos para la detección de cambio

Resultados del método de diferencia de imágenes de reflectancia

Como una muestra, en esta sección se incluyen los resultados del método de la diferencia de las imágenes de la reflectancia bitemporales expresadas mediante los límites de los intervalos para la distribución de los píxeles de áreas con cambio/Ningún Cambio en la cuenca del río Pao desde 1986-2016 (Tabla 6).

El criterio de fijación de los límites de los intervalos para la distribución de los píxeles de áreas es el siguiente, para las áreas de cambio/Ningún Cambio: En el primero: media (μ) +/- 1 desviación estándar (σ). En el segundo: $< \mu$-1σ, $> \mu$+1σ; respectivamente. Los intervalos representados por: media, desviación estándar, intervalos de cambio $<\mu - 1\sigma$, intervalo no-cambio: $\mu +/ - 1\sigma$, intervalos de cambio $>\mu + 1\sigma$ encontrados para la diferencia de imágenes de reflectancia bitemporales son, como una muestra: 1986-2016: 1.71, 6.58, -85--8, -8-12, 12-89.

En la Tabla 6 puede ser observado que la diferencia de las imágenes bitemporales tiende a ser simétrica con media aproximada a cero como en los períodos: 1986-2016, 1990-2016, 1991-2016, 1998-2016, 1999-2016, 2001-2016 y 2015-2016; encontrando sesgo o asimetría en los siguientes períodos: 2000-2016, 2002-2016, 2003-2016.

Tabla 6: Resultados del método de diferencia de imágenes de reflectancia bitemporales expresadas mediante los límites de intervalos para la distribución de píxeles de áreas de Cambio/Ningún Cambio en la cuenca del río Pao desde 1986-2016.

Imágenes Bitemporales	**1986-2016**	**1990-2016**	**1991-2016**	**1998-2016**	**1999-2016**	**2000-2016**	**2001-2016**	**2002-2016**	**2003-2016**	**2015-2016**
μ	1.71	0.06	-0.37	-1.1	-0.13	-5.2	0.19	-6.1	-6.8	1.93
σ	6.58	4.86	5.05	4.66	4.65	5.43	4.91	6.1	6.36	4.98
LI: $< \mu - 1\sigma$	-85–8	-90–7	-79–8	-84–8	-79–7	-85–13	-78–7	-83–14	-87—16	-87–6
NC: μ+/- 1σ	-8-12	-7-7	-8-7	-8-6	-7-7	-13-3	-7-8	-14-2	-16-3	-6-9
LS: $> \mu + 1\sigma$	12-89	7-87	7-77	6-87	7-85	3-53	8-80	2-73	3-83	9-87

Nota, Los parámetros son: media: μ, desviación estándar: σ, ningún cambio NC: μ +/- 1σ límite inferior (LI): $< \mu - 1\sigma$, límite superior (LS): $> \mu + 1\sigma$.

Fuente: Elaboración propia (2026).

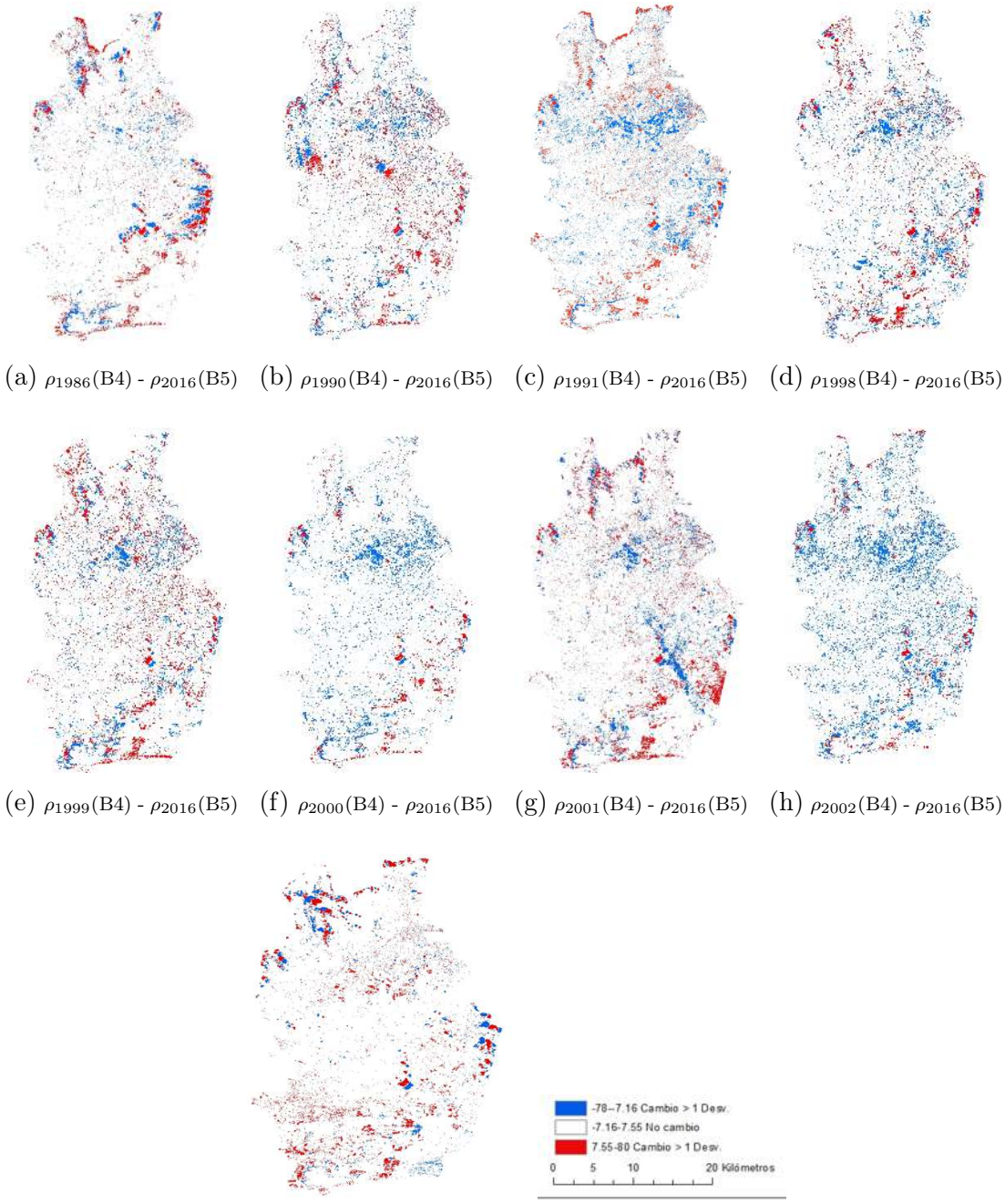
Los resultados del método de la diferencia de las imágenes de la reflectancia bitemporales expresados mediante la matriz de error en la exactitud de la clasificación en la cuenca del río Pao desde 1986-2016 son mostrados en la Tabla 7. En la Tabla 7 se observa la siguiente correspondencia entre los píxeles en el mapa clasificado (MC) de coberturas terrestres (CT) y usos de la tierra (UT) bajo las siguientes tres categorías: Disminución (DIS), Ningún Cambio (NC) e Incremento (INC) y los datos de la referencia (DR) basados en las imágenes corregidas de Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI y Google Earth asociada a estas tres categorías para una muestra de 411 puntos, como una muestra: 1) DIS en MC correspondiente a DIS en DR: 86, DIS en MC correspondiente a NC en DR: 82, DIS en MC correspondiente a INC en DR: 0. Los índices de exactitud global y Kappa son: 70.5 % y 0.61, respectivamente.

El resultado de la aplicación del método de la diferencia de imágenes de reflectancia en la cuenca del río Pao bitemporal 1986-2016 se muestra en la Figura 4.

Tabla 7: Resultados del método de diferencia de las imágenes de reflectancia bitemporales expresados mediante la matriz de error de la clasificación en la cuenca del río Pao desde 1986-2016

Datos Clasificados		**Datos de la Referencia (DR)**			**Totales Clasificados**	**Exactitud de Usuario**	**K**
		DIS	**NC**	**INC**			
Diferencia de Imágenes de Reflectancia 1986-2016						(%)	
MCCT/UT	**DIS**	86	82	0	168	**51.1**	**0.047**
	NC	0	57	0	57	**100.0**	**1.00**
	INC	0	39	147	186	**79.0**	**0.79**
	Totales en la Referencia	**86**	**178**	**147**	**411**		
	Exactitud del productor (%)	**100**	**32.0**	**100**			
Exactitud en la Clasificación Global (%)							**70.5**
Estadístico Kappa Global							**0.61**

Fuente: Elaboración propia (2026).



(a) ρ_{1986}(B4) - ρ_{2016}(B5) (b) ρ_{1990}(B4) - ρ_{2016}(B5) (c) ρ_{1991}(B4) - ρ_{2016}(B5) (d) ρ_{1998}(B4) - ρ_{2016}(B5)

(e) ρ_{1999}(B4) - ρ_{2016}(B5) (f) ρ_{2000}(B4) - ρ_{2016}(B5) (g) ρ_{2001}(B4) - ρ_{2016}(B5) (h) ρ_{2002}(B4) - ρ_{2016}(B5)

(i) ρ_{2015}(B4) - ρ_{2016}(B5) (j) Leyenda

Figura 4: Resultados del método de diferencia de imágenes de reflectancia en la cuenca del río Pao bitemporal 1986-2016. a) 1986-2016, b) 1990-2016, c)1991-2016, d)1998-2026, e)1999-2016, f)2000-2016, g)2001-2016, h)2002-2016, i)2015-2016.

Fuente: Elaboración propia (2026).

Resultados del método de la regresión de imágenes de reflectancia

Los resultados de la regresión lineal de las imágenes bitemporales de reflectancia (%) en la cuenca del río Pao desde 1986-2016 relacionados con los parámetros a, b, r el coeficiente correlación son los siguientes: 1986-2016: 0.36, 14.2, 0.46; 1990-2016: 0.63, 8.31, 0.61; 1991-2016: 0.51, 10.9, 0.52; 1998-2016: 0.56, 8.41, 0.62; 1999-2016: 0.67, 7.55, 0.63; 2000-2016: 0.44, 4.97, 0.64; 2001-2016: 0.67, 8.12, 0.60; 2002-2016: 0.38, 5.24, 0.55; 2003-2016: 0.39, 4.18 ,0.62; 2015-2016: 0.69, 7.65, 0.5.

Los resultados de la aplicación del método de regresión de las imágenes de reflectancia en la cuenca del río Pao bitemporal 2000-2016 se muestran en la Figura 5a y 5b. En la primera son observados 10 500 puntos generados para extraer los valores de la reflectancia en las imágenes de 2000 y 2016. En la segunda, la dispersión de los puntos muestrales de la reflectancia en la imagen de 2000 son representados con respecto a la imagen de reflectancia de 2016. Estos datos son ajustados a un modelo matemático de regresión lineal. El modelo está representado por los parámetros a y b, 0.44 y 4.79; respectivamente. El estadístico coeficiente de determinación es igual a 0.42; lo que equivale a un coeficiente de regresión igual a 0.64. Según Guevara y Cartaya (1991) indican que el grado de correlación es bajo y la capacidad de pronóstico insuficiente. El resto de los coeficientes de regresión son menores a 0.64; variando entre 0.46 y 0.64. Los resultados indican que la imagen regresada bajo estas condiciones excluye los efectos atmosféricos como nubes y sombras; sin embargo como la dispersión es alta en el entorno del modelo lineal gran parte de la información es perdida mediante el uso de la imagen regresada.

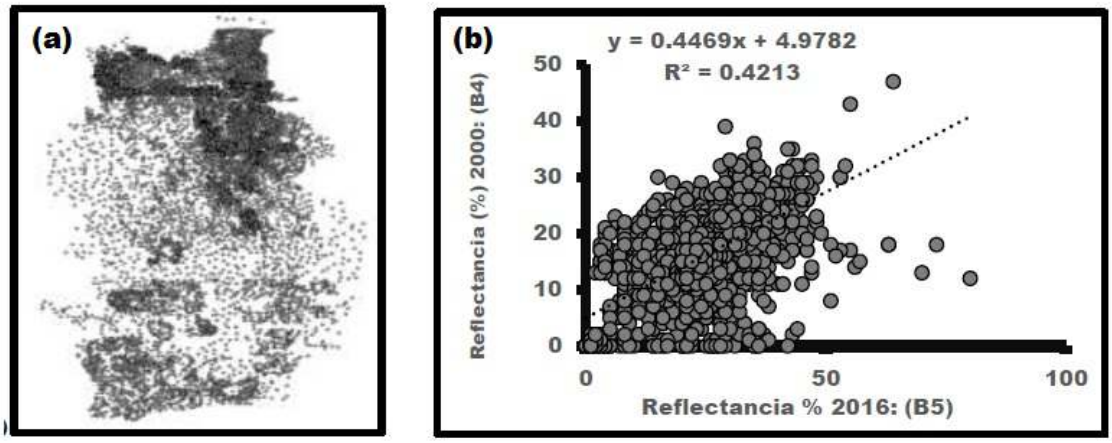


Figura 5: Resultados de aplicación del método de regresión de imágenes de reflectancia en la cuenca del río Pao bitemporal 2000-2016. La banda espectral 4 (B4) de la región espectral del infrarrojo cercano es la seleccionada en las imágenes de reflectancia de s Landsat 7 ETM: 2000. La banda espectral 5 (B5) de la región espectral del infrarrojo cercano es la usada desde la imagen de reflectancia en 2016 de Landsat 8OLI.

Fuente: Elaboración propia (2026).

Los resultados de la aplicación de la diferencia para el método de la regresión de las imágenes de reflectancia en la cuenca del río Pao bitemporal 2000 (B4) - 2016 (B5) se muestran en la Figura 6. Las componentes desde las cuales es generada la imagen diferencia en la Figura 6c son: Figura 6a: Reflectancia (%) en 2000 carente de nubes y sombras. Figura 6b: reflectancia (%) en 2000 regresada y Figura 6c: reflectancia (%) en 2016.

Los resultados son como sigue: 1) hay diferencias significativas entre la imagen original y la regresada de 2000, 2) la imagen regresada de 2000 reproduce predominantemente la variación espacial de las reflectancias observadas en la imagen de 2016, 3) la imagen diferencia de la reflectancia resultante 2000 regresada – 2016 es un patrón de la imagen de 2016; las magnitudes en la reflectancia de 2016 han sido ligeramente atenuadas por la imagen de la reflectancia 2000 regresada; lo que se evidencia en la tendencia negativa observada en la Figura 6c. En síntesis, el método de regresión de imágenes bitemporales de la reflectancia ha resultado ligeramente confiable para la obtención de los cambios en las coberturas y usos de la tierra de la cuenca del rio Pao.

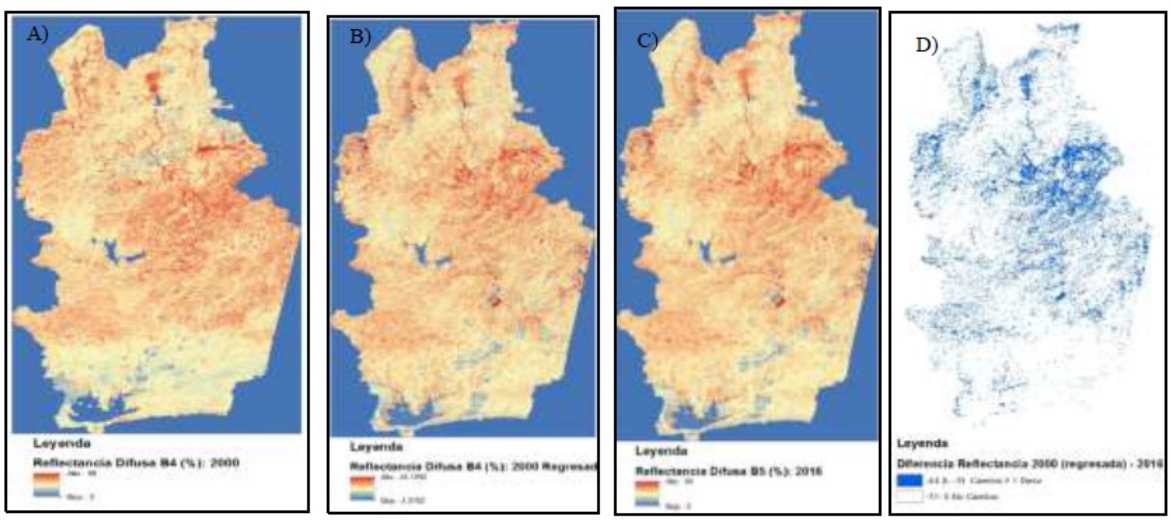


Figura 6: Resultados de aplicación del método de regresión de las imágenes de reflectancia en la cuenca del río Pao bitemporal 2000-2016. La banda espectral 4 (B4) correspondiente a la región espectral del infrarrojo cercano es la seleccionada en las imágenes de reflectancia de Landsat 7 ETM: 2000. a) Reflectancia (%) en 2000. b) Reflectancia (%) en 2000 Regresada. c) Reflectancia (%) en 2016. d) Diferencia de la Reflectancia en 2000 – Reflectancia en 2016

Fuente: Elaboración propia (2026).

Resultados del método de la relación de imágenes de reflectancia

Los resultados del método de la relación de las imágenes bitemporales de la reflectancia (%) expresados mediante la proporción de áreas de Cambio/Ningún Cambio en los mapas

obtenidos en la cuenca del río Pao desde 1986-2016 son los siguientes: : 1986-2016: 2.64 %, 97.4 %. 1990-2016: 0.71 %, 99.3 %. 1991-2016: 0.71 %, 99.3 %. 1998-2016: 0.89 %, 99.1 %. 1999-2016: 0.94 %, 99.1 %. 2000-2016: 0.89 %, 99.1 %. 2001-2016: 0.75 %, 99.3 %. 2002-2016: 0.31 %, 99.7 %. 2003-2016: 0.86 %, 99.1 %. 2015-2016 0.86 %, 99.1 %. Los resultados del método de la relación de las imágenes de la reflectancia bitemporales expresados mediante la matriz de error en la exactitud de la clasificación son mostrados en la Tabla 8.

Tabla 8: Resultados del método de la relación de las imágenes de la reflectancia bitemporales expresados mediante la matriz de error en la exactitud de la clasificación en la cuenca del río Pao desde 1986-2016.

Datos clasificados		**Datos de Referencia**		**Totales Clasificados**	**Exactitud de Usuario (%)**	**K**
		Ningún Cambio	**Incremento**			
Relación de Imágenes de Reflectancia						
Mapa de Clasificación CT/UT	**Ningún Cambio (NC)**	16	0	16	**100.0**	**1**
	Incremento(INC)	74	30	104	**28.8**	**-1.46**
	Totales en la Referencia	**90**	**30**	**120**		
Exactitud del Productor (%)		**17.7**	**100**			
Exactitud en la Clasificación Global (%)						**38.3**
Estadístico Kappa Global						**-0.23**

Fuente: Elaboración propia (2026).

Los resultados de la aplicación del método de la relación de las imágenes de reflectancia % (ρ) en la cuenca del río Pao bitemporal 1986-2016 son mostrados en la Figura 7. La banda espectral 4 (B4) correspondiente a la región espectral del infrarrojo cercano es la seleccionada en las imágenes de la reflectancia de los satélites Landsat 5 TM: 1986, 1990, 1991, 1998, 1999, 2001 y Landsat 7 ETM: 2000, 2002, 2003.

La relación de reflectancia bitemporal específica es mostrada desde la Figura 7a hasta 7i; donde se observa de manera general que las imágenes tienen predominantemente áreas con una relación que varía entre 1 y 2; lo que implica que no hubo cambio. Las áreas donde ocurrieron cambios evidencian relaciones de reflectancias entre 2 y 90. En estas áreas están presentes tres componentes de usos y coberturas terrestres: zonas agrícolas, cuerpos de agua y nubes. En cuanto al cuerpo de agua, círculo en la Figura 7, las relaciones mayores a la unidad se dan en áreas donde éste podría contener una alta proporción de sedimentos (Figuras 7a a 7d); lo que es justificado por el alto uso agrícola en la cuenca vertiente a este embalse en los años anteriores a 2000 señalado con un recuadro en los mapas de las Figuras 7a a 7i. El alto uso agrícola ocasiona alta intensidad de uso del riego de cultivos en la época seca. Los suelos con una alta humedad disminuyen la reflectancia; pudiendo justificar el contraste entre la imagen de la reflectancia de años anteriores a 2016 y éste.

En la Figura 7 se muestra que los usos agrícolas podrían haber disminuido su actividad en el tiempo. La disminución de la actividad agrícola podría ocasionar una reducción del transporte de los sedimentos hacia el cuerpo de agua. Una disminución de los sedimentos en un cuerpo de agua disminuye la reflectancia. Así mismo, los procesos incrementales de eutrofización en los años superiores a 1999 podrían igualar la reflectancia entre los años superiores a 1999 con respecto a 2016; y suprimir el contraste en la relación de reflectancias correspondientes al cuerpo de agua en los mapas desde la Figura 7e a 7i.

Resultados del método de la diferencia de imágenes de índice de vegetación

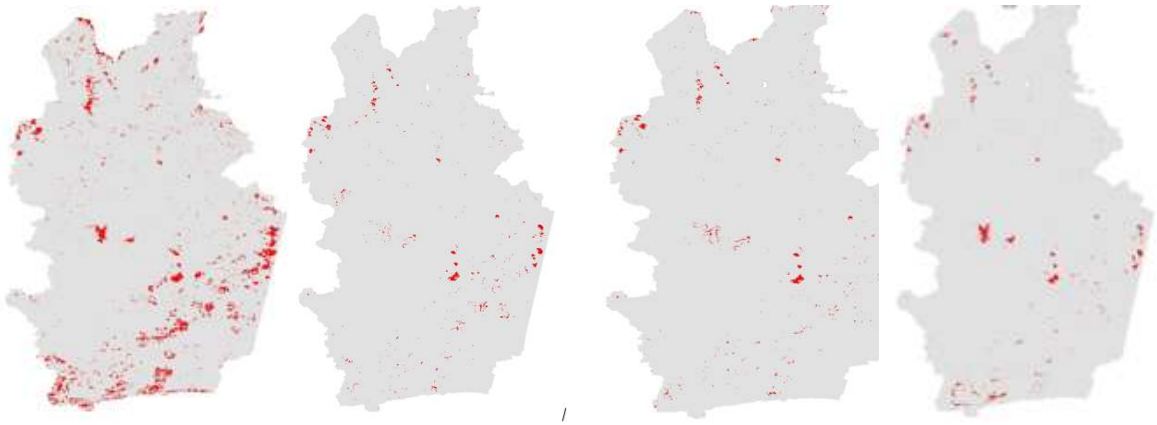
Los resultados del método de la diferencia de las imágenes de NDVI bitemporales expresados mediante la proporción de áreas de cambio/Ningún Cambio en la cuenca del río Pao desde 1986-2016 son los siguientes, como una muestra (Tabla 9): 1986-2016: 1.73 %, 98.3 %.

Tabla 9: Resultados del método de la diferencia de las imágenes de NDVI bitemporales expresadas mediante la proporción de áreas de Cambio/Ningún Cambio en la cuenca del río Pao desde 1986-2016.

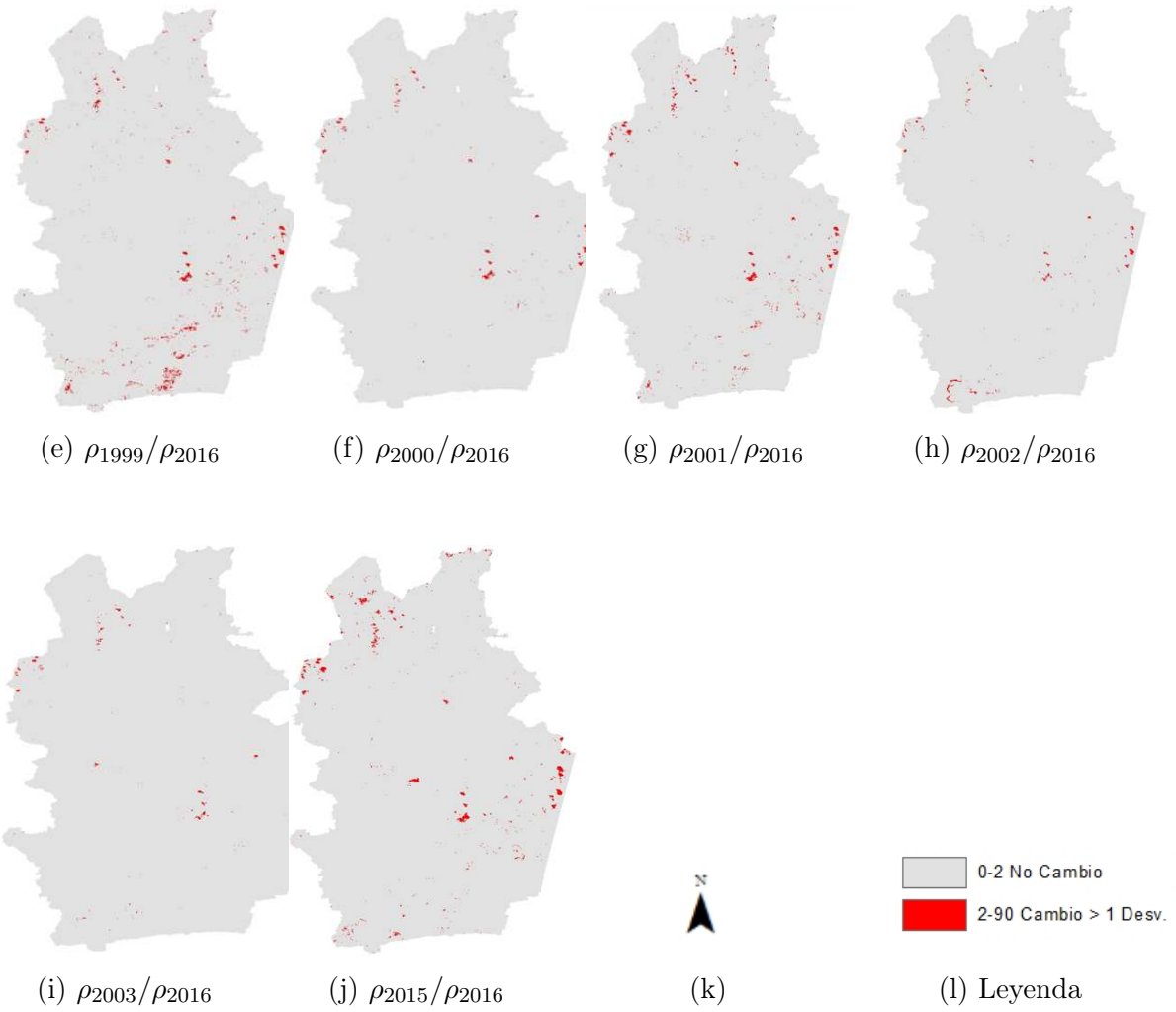
Imágenes bitemporales	1986-2016	1990-2016	1991-2016	1998-2016	1999-2016	2000-2016	2001-2016	2002-2016	2003-2016	2015-2016
RPA: C	1.73	1.18	1.66	1.57	2.09	3.57	1.71	5.60	5.31	1.82
RPA: NC	98.2	98.8	98.3	98.4	97.9	96.4	98.2	94.4	94.6	98.1

Nota: Los parámetros son: C: Cambio, NC: Ningún Cambio, RPA: Relación Porcentual de Área.

Fuente: Elaboración propia (2026).



(a) ρ_{1986}/ρ_{2016} (b) ρ_{1990}/ρ_{2016} (c) ρ_{1991}/ρ_{2016} (d) ρ_{1998}/ρ_{2016}



(e) ρ_{1999}/ρ_{2016} (f) ρ_{2000}/ρ_{2016} (g) ρ_{2001}/ρ_{2016} (h) ρ_{2002}/ρ_{2016}

(i) ρ_{2003}/ρ_{2016} (j) ρ_{2015}/ρ_{2016} (k) (l) Leyenda

Figura 7: Resultados del método de la relación de las imágenes de reflectancia (ρ) en la cuenca del río Pao bitemporal 1986-2016: a) 1986-2016, b) 1990-2016, c)1991-2016, d)1998-2026, e)1999-2016, f)2000-2016, g)2001-2016, h)2002-2016, i) 2003-2016, j)2015-2016

Fuente: Elaboración propia (2026).

Los resultados del método de la diferencia de las imágenes de la NDVI bitemporales expresados mediante la matriz de error en la exactitud de la clasificación en la cuenca del río Pao desde 1986-2016 son mostrados en la Tabla 10; dónde se observa la correspondencia entre los píxeles en el mapa clasificado (MC) de coberturas terrestres (CT) y usos de la tierra (UT). Los resultados de las operaciones matemáticas sobre píxeles en áreas con nubes y sombras han sido agrupados bajo la categoría de ningún cambio.

Tabla 10: Resultados del método de la diferencia de las imágenes de la NDVI bitemporales expresados mediante la matriz de error en la exactitud de la clasificación en la cuenca del río Pao desde 1986-2016.

Datos clasificados		Datos de Referencia			Totales Clasificados	Exactitud de Usuario (%)	K
		DIS	NC	INC			
Diferencia de Imágenes NDVI 1986-2016							
Mapa de Clasificación CT/UT	**DIS**	39	2	0	41	95.1	0.95
	NC	0	32	0	32	100.0	1
	INC	0	15	12	27	44.4	-0.25
	Totales en la referencia	**39**	**49**	**12**	**100**		
Exactitud del productor (%)		100	65.3	100			
Exactitud en la Clasificación Global (%)							**83.0**
Estadístico Kappa Global							**0.56**

Nota: Disminución (DIS), Ningún Cambio (NC), Incremento (INC).

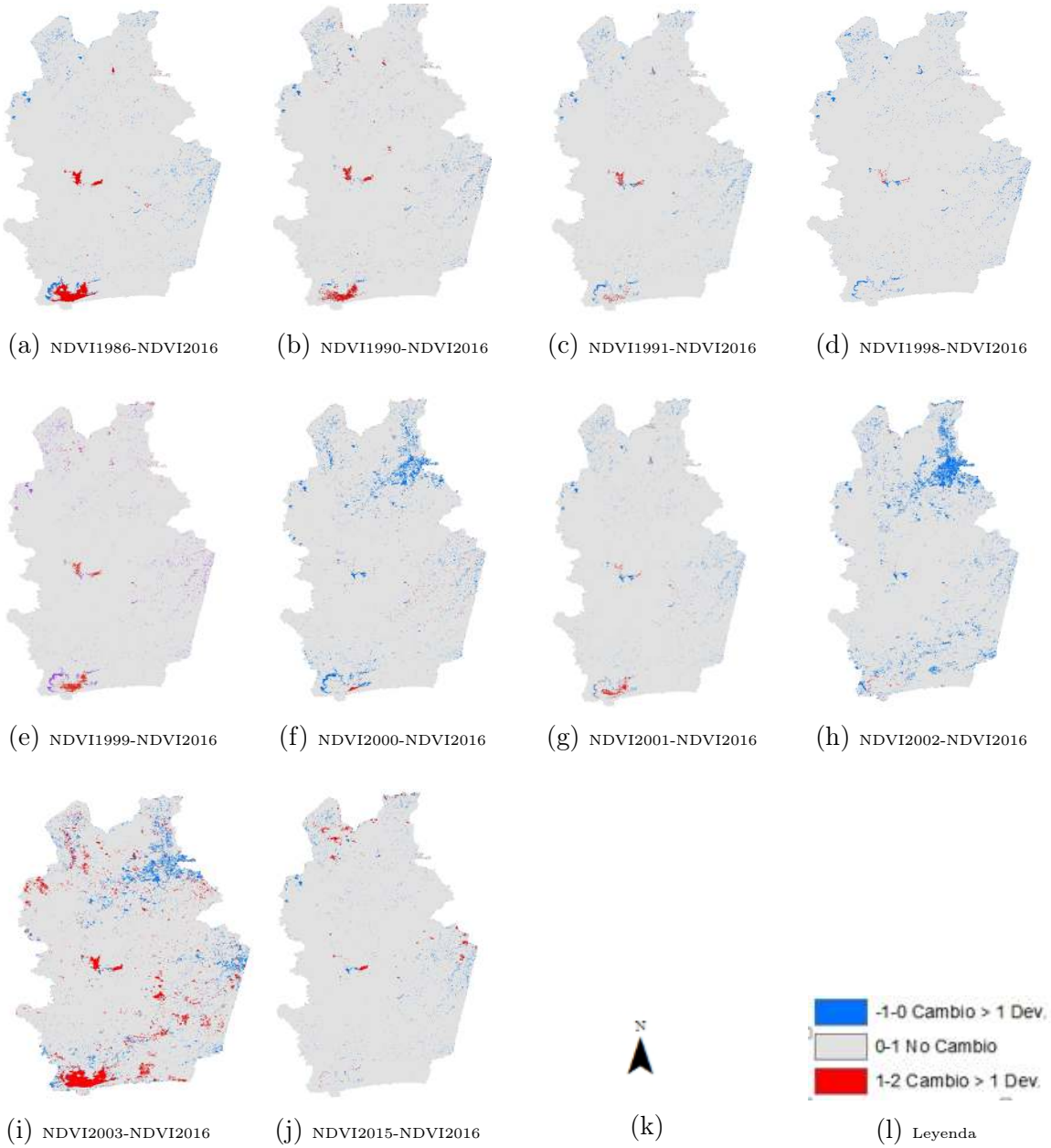
Fuente: Elaboración propia (2026).

Los resultados del método de la diferencia de las imágenes de NDVI en la cuenca del río Pao bitemporal 1986-2016 se muestran en la Figura 8; donde las bandas espectrales 3 (B3) y 4 (B4) de la reflectancia correspondiente a las regiones del rojo e infrarrojo cercano son las usadas para la estimación del NDVI desde las imágenes de los satélites Landsat 5 TM: 1986, 1990, 1991, 1998, 1999, 2001 y Landsat 7 ETM: 2000, 2002, 2003. Las bandas espectrales 4 (B4) y 5 (B5) correspondientes a la región espectral del rojo e infrarrojo cercano son las usadas para la estimación del NDVI desde las imágenes de reflectancia del satélite Landsat 8 OLI.

La diferencia de NDVI bitemporal específica desde la Figura 8a hasta 8j muestra: en primer lugar, los valores de NDVI similares en la fecha 1 y en la fecha 2; dando como resultado diferencias que varían entre 0 y 1 predominantemente; lo que implica zonas donde no hubo cambio bitemporal. En segundo lugar, los valores positivos que varían entre 1 y 2 principalmente en los tres cuerpos de aguas o embalses que posee la cuenca del río Pao. Los valores positivos están asociados al NDVI2016; el cual es un valor de signo negativo y a un valor aproximadamente nulo del NDVI en las imágenes de fechas anteriores a 2016. El valor de signo negativo se debe a que la reflectancia en la banda espectral de la región espectral del rojo (B4) es más alta que la reflectancia en la banda espectral de la región espectral del infrarrojo cercano (B5). En tercer lugar, los valores negativos de la diferencia de NDVI se deben a valores negativos del NDVI en fechas entre 1986 y 2003; siendo aproximadamente nulo el valor de NDVI2016.

Las zonas donde ocurre este caso corresponden a usos urbanos y humedales próximos a los tres cuerpos de agua. En el primero el material asociado es el concreto y en el segundo componentes orgánicos como fitoplancton; cuyo perfil espectral muestra que la reflectancia en la banda espectral 3 (B3) es mayor que la reflectancia en la banda espectral 4 (B4) de las

imágenes Landsat 5 TM y 7 ETM (Bojinski et al., 2004; Giri y Jenkins, 2005; Han y Rundquist, 1997; Jensen, 2009).



(a) NDVI1986-NDVI2016 (b) NDVI1990-NDVI2016 (c) NDVI1991-NDVI2016 (d) NDVI1998-NDVI2016

(e) NDVI1999-NDVI2016 (f) NDVI2000-NDVI2016 (g) NDVI2001-NDVI2016 (h) NDVI2002-NDVI2016

(i) NDVI2003-NDVI2016 (j) NDVI2015-NDVI2016 (k) (l) Leyenda

Figura 8: Resultados del método de la diferencia de las imágenes de NDVI en la cuenca del río Pao bitemporal 1986-2016. a) 1986-2016, b) 1990-2016, c)1991-2016, d)1998-2026, e)1999-2016, f)2000-2016, g)2001-2016, h)2002-2016, i) 2003-2016, j)2015-2016

Fuente: Elaboración propia (2026).

Resultados del método de análisis de vector de cambio en imágenes de reflectancia

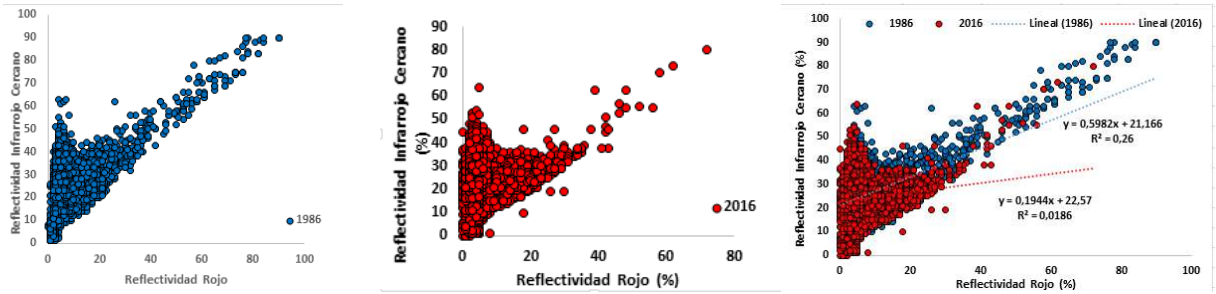
Los resultados de este método son mostrados en la Tabla 11

Tabla 11: Resultados del método de vector de cambio en la cuenca del río Pao desde 1986-2016. Los parámetros del método son generados desde la relación lineal entre la reflectancia en la banda espectral 4 vs la reflectancia en la banda espectral 3 en imágenes Landsat 5TM y 7ETM como son: el ángulo en la fecha 1, el ángulo en la fecha 2 y la diferencia de ángulos entre la fecha 1 y la fecha 2.

Imágenes bitemporales		**1986-2016**	**1990-2016**	**1991-2016**	**1998-2016**	**1999-2016**	**2000-2016**	**2001-2016**	**2002-2016**	**2003-2016**	**2015-2016**
Vector de Cambio	ϑ_1	30.8	11.0	10.6	12.3	10.8	2.54	21.6	11.0	10.9	25.7
	ϑ_1	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0
	$\Delta\vartheta$	19.8	0.01	-0.32	1.31	-0.17	-8.46	10.6	0.08	-0.09	14.73

Fuente: Elaboración propia (2026).

En la Figura 9 son mostrados los resultados del método de vector de cambio sobre imágenes de reflectancia en la cuenca del río Pao bitemporal 1986-2016. Las bandas espectrales 3 (B3) y 4 (B4) de reflectancia correspondiente a las regiones del rojo e infrarrojo cercano son las usadas para la estimación de reflectancia desde las imágenes de los satélites Landsat 5 TM: 1986, 1990, 1991, 1998, 1999, 2001 y Landsat 7 ETM: 2000, 2002, 2003. Las bandas espectrales 4 (B4) y 5 (B5) correspondiente a la región espectral del rojo e infrarrojo cercano son las usadas para la estimación de los valores de reflectancia desde las imágenes de reflectancia del satélite Landsat 8 OLI. El modelo lineal es mostrado desde a hasta l. Las Figuras 9a y 9b muestran la dispersión de los valores de reflectancia en forma independiente; siendo creciente y lineal. La Figura 9c muestra el resultado de la superposición de las Figuras 7a y 7b.



(a) (b) (c)

Figura 9: Resultados del método de vector de cambio expresado mediante la diferencia de los ángulos de inclinación y distancia entre vectores derivados de información de parámetros de ajuste de modelos lineales a las observaciones de reflectancia en la cuenca del río Pao a partir de imágenes bitemporales en el período 1986-2016.

Fuente: Elaboración propia (2026).

Las tendencias mostradas en las Figuras 9a, 9b y 9c son similares a aquellas observadas en las Figuras 10a hasta 10j. Los modelos lineales encontrados según cada conjunto de imágenes bitemporal están basados en los parámetros a, b y el estadístico r. Las diferencias significativas entre los ángulos de dirección de cada conjunto de datos de reflectancia se encuentran entre la información extraída de las imágenes bitemporales siguientes: 1986-2016: 19.8°, 2001-2016: 10.6° y 2015-2016: 14.7°. Este cambio significativo podría ser debido a la ocurrencia de: 1) alta cobertura vegetal de un año con respecto; lo que eleva la reflectancia como es el caso de 2000-2016, alta presencia de nubes y sombras como es el caso de 1986-2016, 2001-2016, 2015-2016.

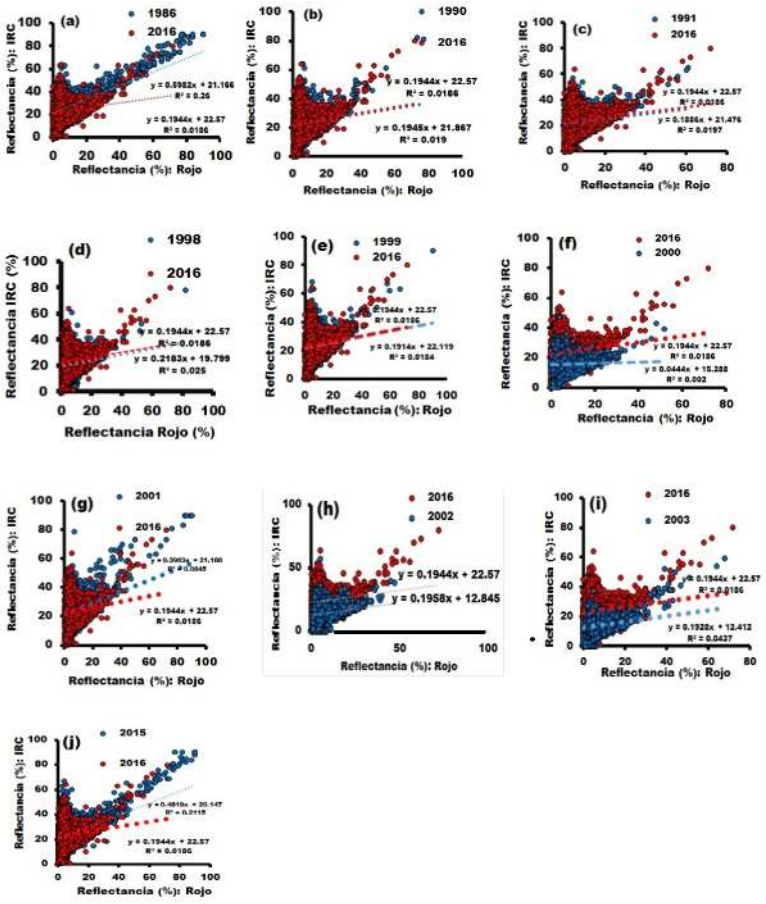


Figura 10: Resultados del método de vector de cambio expresado mediante la diferencia de los ángulos de inclinación y distancia entre vectores derivados de información de parámetros de ajuste de modelos lineales a las observaciones de reflectancia en la cuenca del río Pao a partir de imágenes bitemporales en el período 1986-2016. (a)1986-2016, (b)1990-2016, (c)1991-2016, (d)1998-2016, (e) 1999-2016, (f) 2000-2016, (g) 2001-2016, (h) 2002-2016, (i) 2003-2016, (j) 2015-2016

Fuente: Elaboración propia (2026).

Resultados de métodos de transformación

Resultados del método de transformación basado en las componentes principales

Las componentes principales se definen en este estudio como el conjunto de combinaciones lineales ortogonales de la reflectancia entre las bandas espectrales 1 a 6 que tienen la máxima varianza. La imagen de reflectancia de Landsat 5 TM está integrada por seis bandas espectrales correspondientes a seis regiones del espectro electromagnético como sigue: Banda espectral 1: 0.45 – 0.51 μm. Banda espectral 2: 0.52 – 0.60 μm. Banda espectral 3: 0.62– 0.69 μm. Banda espectral 4: 0.77 – 0.90 μm. Banda espectral 5: 1.56 – 1.78 μm y Banda espectral 7: 2.09 – 2.34 μm.

El propósito de determinar las componentes principales es reducir la dimensionalidad de la variable reflectancia contenida en seis bandas espectrales a una o dos componentes antes de aplicar sobre éstas las técnicas de detección de cambios de uso de la tierra y coberturas terrestres en la cuenca del río Pao. Los vectores de coeficientes expresados como covarianzas o correlación de las seis componentes principales obtenidas a partir de la combinación lineal de las seis variables representadas por la reflectancia en cada una de las seis bandas espectrales de la imagen Landsat 5 TM están contenidos en la Tabla 12.

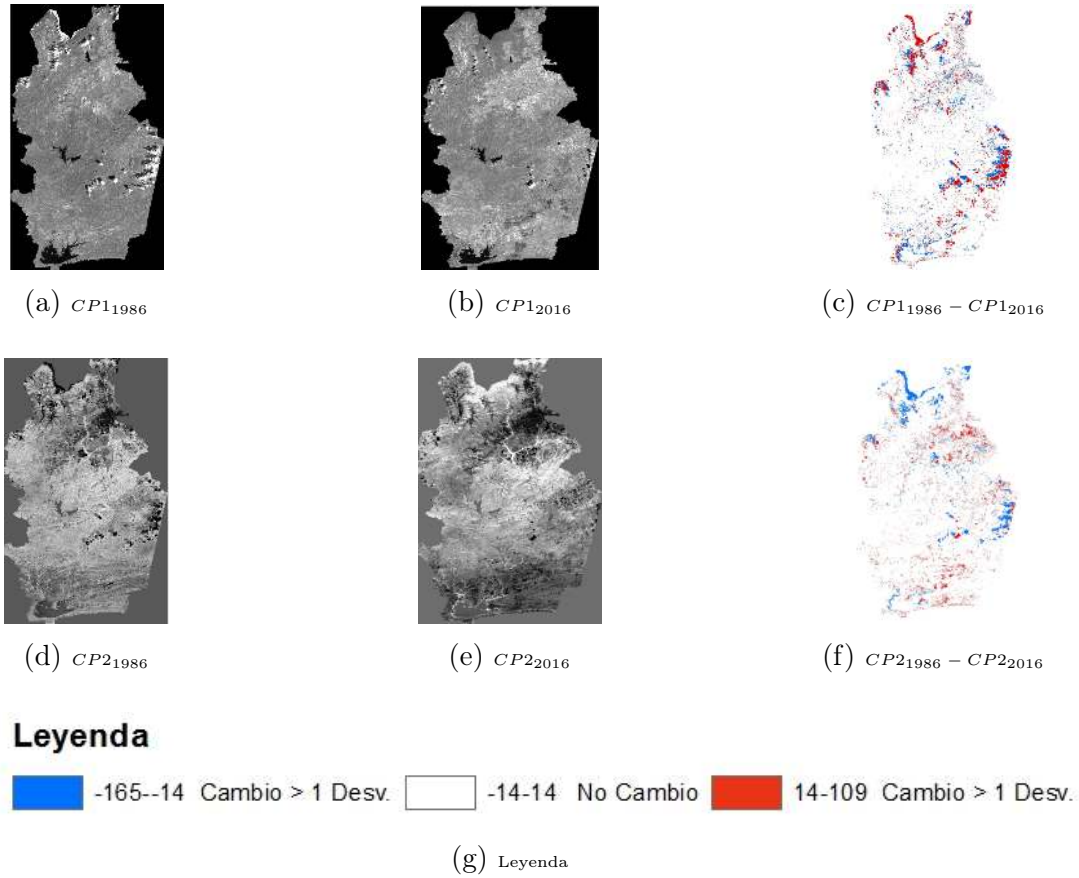
Tabla 12: Resultados del método de transformación componentes principales expresada mediante la matriz de covarianzas y de correlación de la imagen de reflectancia (%) 1986 en la cuenca del río Pao.

COVARIANZAS	**CP1**	**CP2**	**CP3**	**CP4**	**CP5**	**CP6**
Banda espectral 1	31.4	36.5	34.7	52.4	52.0	41.8
Banda espectral 2	36.5	44.7	42.3	69.3	67.3	52.0
Banda espectral 3	34.7	42.3	41.5	58.8	62.7	50.4
Banda espectral 4	52.4	69.3	58.8	191.3	149.6	90.7
Banda espectral 5	52.0	67.3	62.7	149.6	147.8	98.6
CORRELACIÓN	**CP1**	**CP2**	**CP3**	**CP4**	**CP5**	**CP6**
Banda espectral 1	1.00	0.97	0.96	0.67	0.76	0.86
Banda espectral 2	0.97	1.00	0.98	0.74	0.82	0.90
Banda espectral 3	0.96	0.98	1.00	0.65	0.80	0.91
Banda espectral 4	0.67	0.74	0.65	1.00	0.88	0.76
Banda espectral 5	0.76	0.82	0.80	0.88	1.00	0.94
Banda espectral 7	0.86	0.90	0.91	0.76	0.94	1.00

Fuente: Elaboración propia (2026).

Los resultados del método de transformación basados en las componentes principales expresados mediante la diferencia de la componente principal No. 1 basada en imágenes de reflectancia bitemporal como proporción de áreas de cambio/Ningún Cambio en la cuenca del

río Pao desde 1986-2016 son: 1986-2016: 8.41 %, 91.5 %; 1990-2016: 13.4 %, 86.5 %; 1991-2016: 6.43 %, 93.5 % ; 1998-2016: 6.98 %, 93.0 %; 1999-2016: 7.03 %, 92.9 %; 2000-2016: 5.43 %, 94.5 %; 2001-2016: 6.95 %, 93.0 % ; 2003-2016: 4.80 %, 95.2 %; 2015-2016: 3.80 %, 96.2 % En la Figura 11 se muestran resultados del método de transformación en componentes principales expresado mediante la diferencia de la componente principal N° 1 basada en imágenes de reflectancia bitemporal como proporción de áreas de cambio/Ningún Cambio. Las zonas en rojo representan disminución de área vegetadas; así como áreas de ocurrencias de nubes. Las zonas en azul representan incrementos de usos urbanos y compuestos e inorgánicos en cuerpos de agua.



(a) $CP1_{1986}$ (b) $CP1_{2016}$ (c) $CP1_{1986} - CP1_{2016}$

(d) $CP2_{1986}$ (e) $CP2_{2016}$ (f) $CP2_{1986} - CP2_{2016}$

(g) Leyenda

Figura 11: Resultados del método de transformación componentes principales expresado mediante la diferencia de la componente principal N° 1 basada en imágenes de reflectancia bitemporal como proporción de áreas de cambio/Ningún Cambio en la cuenca del río Pao desde 1986-2016. a) Componente principal N°1 derivada de la imagen de reflectancia en 1986. b) Componente principal N°1 derivada de la imagen de reflectancia en 2016. c) Diferencia de la componente principal N°1 bitemporal 2016-1986. d) Componente principal N°2 derivada de la imagen de reflectancia en 1986. e) Componente principal N°2 derivada de la imagen de reflectancia en 2016. f) Diferencia de la componente principal N°2 bitemporal 2016-1986.

Fuente: Elaboración propia (2026).

En las Tabla 13 y Figura 12 son mostrados los resultados del método de la diferencia de las imágenes de la Componente Principal N° 1 bitemporales expresados mediante la matriz de error en la exactitud de la clasificación en la cuenca del río Pao desde 1986-2016 dónde se observa la siguiente correspondencia entre los píxeles en el mapa clasificado (MC) de coberturas terrestres (CT) y usos de la tierra (UT) bajo las siguientes tres categorías: Disminución (DIS), Ningún Cambio (NC) e Incremento (INC) y los datos de la referencia (DR) basados en las imágenes corregidas de Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI y Google Earth asociada a estas tres categorías para una muestra de 891 puntos: 1) DIS en MC correspondiente a DIS en DR: 352, DIS en MC correspondiente a NC en DR: 85, DIS en MC correspondiente a INC en DR: 0. Los índices de exactitud global y Kappa son: 84.4 % y 0.87, respectivamente.

En las Tablas 13, 14, 15 y 16 también son mostrados los resultados de las matrices de error de los siguientes métodos: 1) diferencia de las imágenes de índice de brillo bitemporales basadas en número digital, 2) diferencia de las imágenes de índice de brillo bitemporales basadas en imágenes de reflectancia, 3) diferencia de imágenes de la Componente Principal N° 1 basada en imágenes de índices de brillo y verdor bitemporales en la cuenca del río Pao desde 1986-2000 dónde se observa la siguiente correspondencia entre los píxeles en el mapa clasificado (MC) de coberturas terrestres (CT) y usos de la tierra (UT) bajo las siguientes tres categorías: Disminución (DIS), Ningún Cambio (NC) e Incremento (INC) y los datos de la referencia (DR) basados en las imágenes corregidas de Landsat 5 TM y 7 ETM asociadas a estas tres categorías para una muestra de 100, 103 y 100 puntos, respectivamente. Los resultados de las operaciones matemáticas sobre píxeles en áreas con nubes y sombras han sido agrupados bajo la categoría de ningún cambio.

Tabla 13: Resultados del método de la diferencia de las imágenes de la componente principal N° 1 bitemporales expresados mediante la matriz de error en la exactitud de la clasificación en la cuenca del río Pao desde 1986-2016.

Datos Clasificados		**Datos de Referencia (DR)**			**Totales Clasificados**	**Exactitud de Usuario (%)**	**K**
		DIS	**NC**	**INC**			
1.-Diferencia de Imágenes CP1 1986-2016							
Mapa de Clasificación CT/UT	**DIS**	352	85	0	437	80.5	0.75
	NC	0	20	0	20	100.00	1
	INC	0	54	380	434	87.5	0.85
	Totales en la Referencia	352	159	380	891		
Exactitud del Productor (%)		100	12.5	100			
Exactitud en la Clasificación Global (%)							84.4
Estadístico Kappa Global							0.87

Fuente: Elaboración propia (2026).

Tabla 14: Resultados del método de la diferencia de las imágenes de índice de brillo bitemporales basadas en imágenes de número digitales 1986-2000

2.-Diferencia de imágenes de índice de brillo basado en imágenes de números digitales: 1986-2000							
Mapa de Clasificación CT/UT	**DIS**	51	14	0	65	78.4	0.72
	NC	0	8	0	8	100.0	1
	INC	0	1	26	27	96.3	0.96
	Totales en la referencia	51	23	26	100		
	Exactitud del productor (%)	100	34.7	100			
Exactitud en la Clasificación Global (%)							85.0
Estadístico Kappa Global							0.89

Fuente: Elaboración propia (2026).

Tabla 15: Resultados del método de la diferencia de las imágenes de índice de brillo bitemporales basadas en imágenes de reflectancia 1986-2000

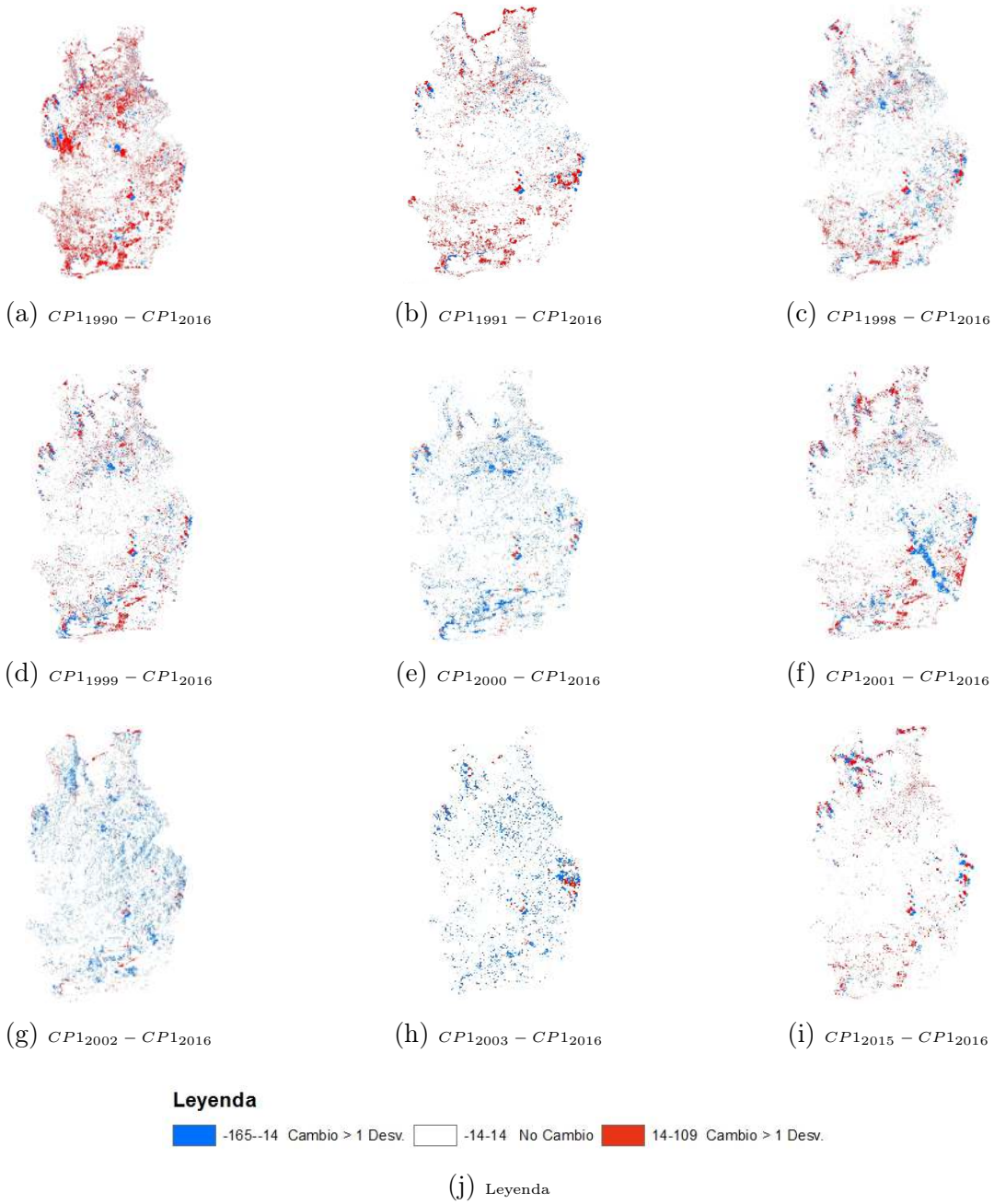
3.- Diferencia de Imágenes Índice Brillo basada en Imágenes de Reflectancia: 1986 - 2000							
Mapa de Clasificación CT/UT	**DIS**	31	15	0	46	67.3	0.51
	NC	0	3	0	3	100.0	1
	INC	0	14	40	54	74.0	0.65
	Totales en la referencia	31	32	40	103		
	Exactitud del productor (%)	100	9.3	100			
Exactitud en la Clasificación Global (%)							71.8
Estadístico Kappa Global							0.72

Fuente: Elaboración propia (2026).

Tabla 16: Diferencia de imágenes CP1 basado en imágenes de índice de brillo y verdor 1986-2000.

4.-Diferenciade Imágenes CP1 basado en imágenes de índices de brillo y verdor: 1986 - 2000							
Mapa de Clasificación CT/UT	**DIS**	26	2	0	28	92.8	0.92
	NC	0	5	0	5	100.0	1
	INC	0	7	60	67	89.5	0.98
	Totales en la referencia	26	14	60	100		
	Exactitud del productor (%)	100	35.7	100			
Exactitud en la Clasificación Global (%)							91.0
Estadístico Kappa Global							0.96

Fuente: Elaboración propia (2026).



(a) $CP1_{1990} - CP1_{2016}$ (b) $CP1_{1991} - CP1_{2016}$ (c) $CP1_{1998} - CP1_{2016}$

(d) $CP1_{1999} - CP1_{2016}$ (e) $CP1_{2000} - CP1_{2016}$ (f) $CP1_{2001} - CP1_{2016}$

(g) $CP1_{2002} - CP1_{2016}$ (h) $CP1_{2003} - CP1_{2016}$ (i) $CP1_{2015} - CP1_{2016}$

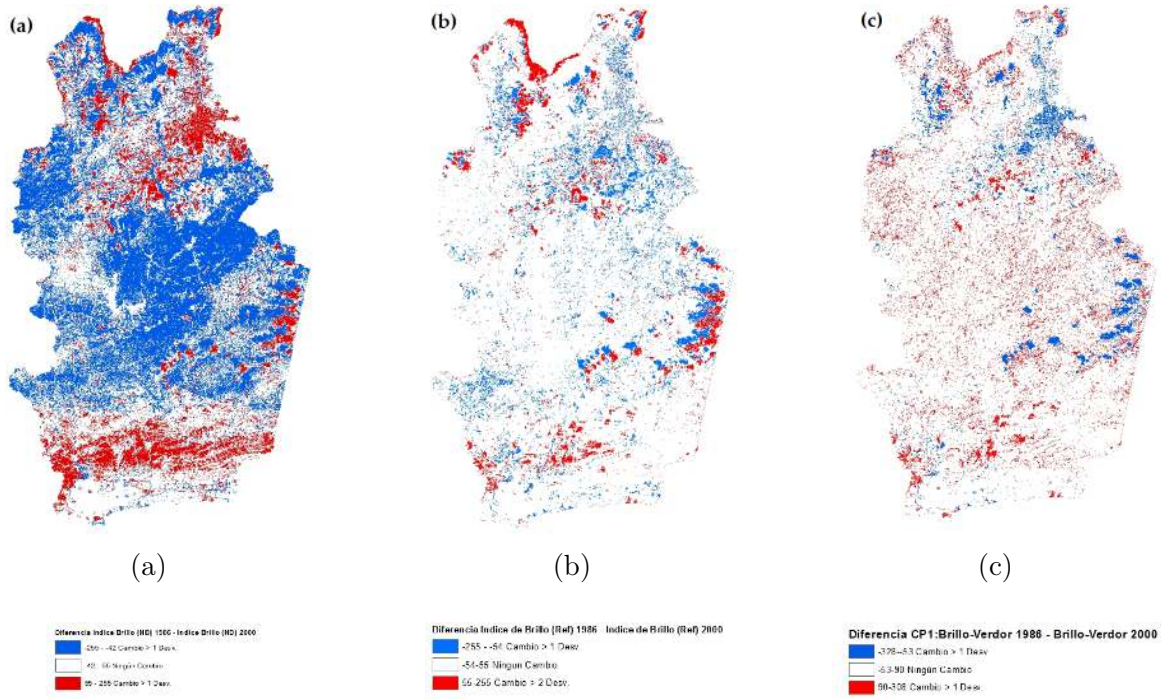
(j) Leyenda

Figura 12: Resultados del método de transformación componentes principales expresado mediante la diferencia de la componente principal N° 1 basada en imágenes de reflectancia bitemporal como proporción de áreas de Cambio/Ningún Cambio en la cuenca del río Pao desde 1986-2016. a) 1986-2016, b) 1990-2016, c)1991-2016, d)1998-2026, e)1999-2016, f)2000-2016, g)2001-2016, h)2002-2016, i) 2003-2016, j)2015-2016

Fuente: Elaboración propia (2026).

Resultados del método de transformación Kauth y Thomas

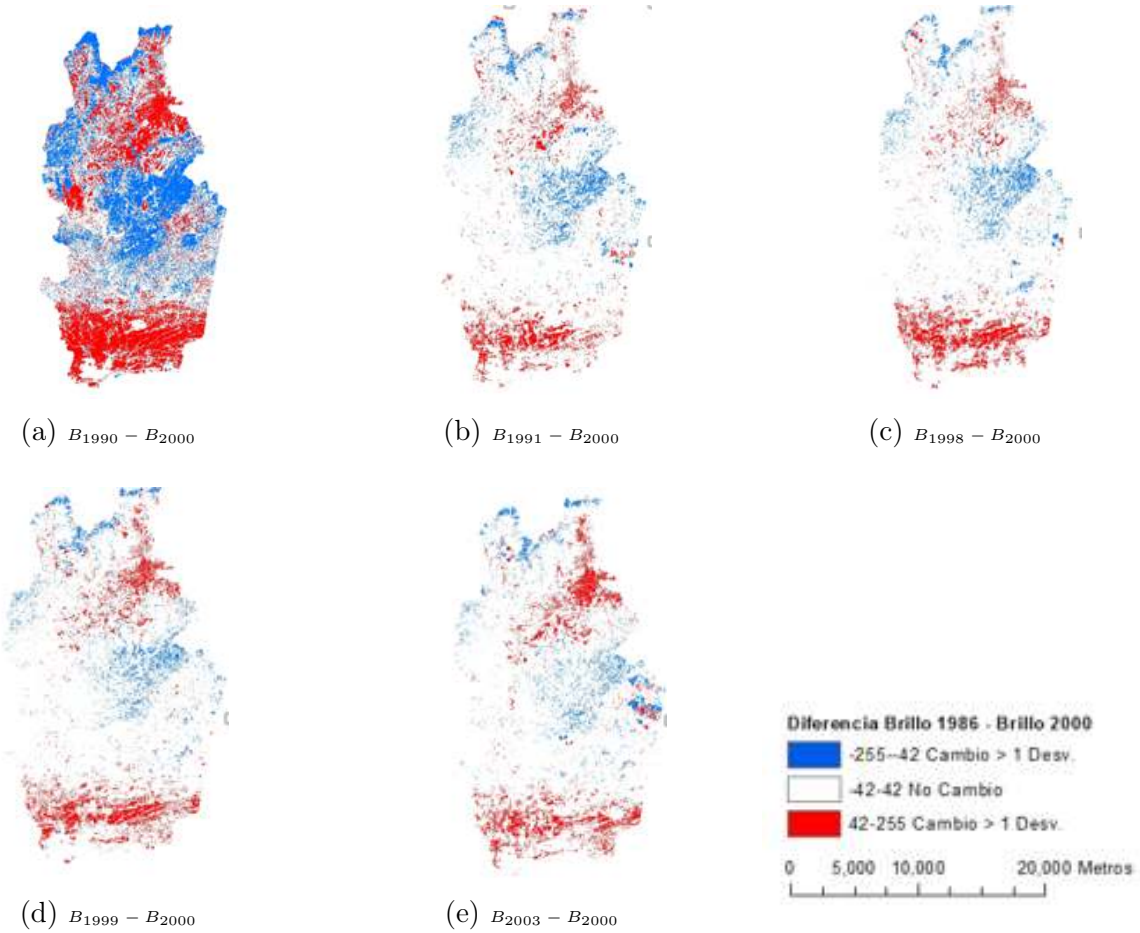
En las Figuras 13 y 14 se observan los resultados del método de transformación Kauth-Thomas expresado mediante la diferencia del Índice de Brillo basada en imágenes de número digital bitemporal como proporción de áreas de cambio/Ningún Cambio en la cuenca del río Pao desde 1986-2000; donde se observan tres aspectos: 1) los valores negativos del índice de brillo corresponden a zonas donde ha habido incrementos de las coberturas vegetales bitemporal representadas en color azul, 2) los valores próximos a cero equivale a zonas donde no ha ocurrido cambio bitemporal en las coberturas y usos de la tierra y 3) los valores positivos equivalen a zonas donde ha disminuido el índice de brillo de la imagen antes de 2016 y la imagen de 2016; significando un posible incremento en el uso urbano y agropecuario; lo que se hace más evidente en las diferencias bitemporales 1986-2016 y 1990-2016.



(a) (b) (c)

Figura 13: Resultados del método de transformación Kauth-Thomas expresado mediante: a) Diferencia del Índice de Brillo basado en imágenes de Número Digital: 1986 - 2000, b) Diferencia de Índice de Brillo basado en imágenes de Reflectancia: 1986-2000 y c) Diferencia de la Componente Principal N° 1 basada en Imágenes de Brillo y Verdor: 1986-2000. Las Figura 20 a hasta 20c muestra las áreas de Cambio/Ningún Cambio en la cuenca del río Pao desde 1986-2000

Fuente: Elaboración propia (2026).



(a) $B_{1990} - B_{2000}$ (b) $B_{1991} - B_{2000}$ (c) $B_{1998} - B_{2000}$

(d) $B_{1999} - B_{2000}$ (e) $B_{2003} - B_{2000}$

Figura 14: Resultados del método de transformación Kauth-Thomas expresado mediante diferencia del Índice de Brillo (B) en imágenes de número digital difusa bitemporal como proporción de áreas de Cambio/Ningún Cambio en la cuenca del río Pao desde 1986-2000.
Fuente: Elaboración propia (2026).

Discusión de resultados

El método de comparación postclasificación da como resultado nueve clases: a) urbano, b) agrícola, c) agropecuario, d) agua, e) suelo degradado , f) vegetación, g) nubes, h) sombra y i) no clasificado. La exactitud del usuario varió entre 88.8 y 100 %. La exactitud del productor varió entre 98.2 y 100 %. El índice de exactitud global y el índice de Kappa correspondiente a los mapas clasificados en comparación con la imagen de referencia de Google Earth variaron entre 93 % y 99.4 %, 0.96 y 0.99, respectivamente. Muchos estudios discuten las clasificaciones con exactitud global por debajo del objetivo general del 85 % basado en la revisión de 25 artículos. Así como, tienen un amplio rango en la exactitud con la que las clases individuales han sido clasificadas (Trodd, 1995).

Según Foody (2002), los componentes sugeridos para establecer la exactitud como: una matriz de error y una métrica basada en el coeficiente kappa no se proporcionan y las exactitudes destino son rara vez alcanzadas; basadas en niveles de precisión para todas las clases y la precisión global $> 85\,\%$. Trodd (1995) encontró que el rango promedio en la exactitud del productor de las clasificaciones revisadas fue de 59 %. Landis y Koch (1977) sugieren que el índice Kappa entre 0.81 y 1 indica una fuerza de concordancia de moderada a casi perfecta.

Los índices de exactitud de los mapas de clasificación en los usos y coberturas terrestres de la cuenca del rio Pao indican un nivel satisfactorio obtenido a partir de imágenes de reflectancia de los satélites Landsat 5 TM, 7 ETM y 8 OLI en el período 1986 hasta 2016. En el método de comparación postclasificación, la diferencia bitemporal se lleva a cabo entre la imagen del tiempo 1 (1986) y la imagen del tiempo 2 (2016), correspondientes a las áreas ocupadas según la clase de usos de la tierra y coberturas terrestres expresadas en proporción porcentual máxima correspondiente a la cuenca del río Pao desde 1986-2016.

Esta diferencia de imágenes bitemporal muestra que las clases que presentan los incrementos son: urbano: 1.37 % y agropecuario: 23 %; mientras que aquellas dónde ocurren los descensos son las siguientes: agrícola: 4.97 %; agua: 0.55 %; vegetación: 8.1 %; suelo deforestado: 12 %.

En cuanto al uso urbano, el Instituto Nacional de Estadística (2011) ha registrado un crecimiento desde 1990 hasta 2011 que varía desde 21.7 habitantes/km^2 hasta 31.9 habitantes/km^2.

Según los resultados obtenidos desde la matrices de error de los métodos de preclasificación; siendo estas matrices derivadas desde una muestra de las operaciones algebraicas y de transformación sobre las imágenes bitemporales como son: Landsat 5 TM de 1986 y Landsat 8 OLI de 2016 para los cuatro primeros métodos; así como Landsat 5 TM 1986 y 2000 para el quinto método de Kauth y Thomas, son indicados como sigue: 1) diferencia de imágenes de reflectancia en la banda espectral del infrarrojo cercano; banda espectral 4 (0.77-0.90 μm) en Landsat 5 TM, banda espectral 4 (0.77-0.89 μm) en Landsat 7 ETM y la banda espectral 5 (0.85-0.88 μm) en Landsat 8 OLI, 2) relación de imágenes de reflectancia, 3) diferencia de índice de vegetación NDVI, 4) diferencia de la componente principal N° 1 basada en la imagen de reflectancia de cada año, y 5) diferencia del índice de brillo obtenida desde el método de Kauth y Thomas.

Mediante los resultados descritos, se encuentra que: en primer lugar, los índices de exactitud global y Kappa obtenidos son: a) 70.5 % y 0.61, b) 38.3 % y -0.23, c) 83.0 % y 0.56, d) 84.4 % y 0.87 y e) 85.0 % y 0.89, respectivamente.

En segundo lugar, los índices de exactitud en la clasificación de la detección de los cambios/ningún cambio de las imágenes diferencia o relación sugieren la siguiente categorización en orden del más al menos exacto: a) diferencia del índice de brillo obtenida desde el método de Kauth y Thomas, b) diferencia de la componente principal N° 1 basada en la imagen de reflectancia, c) diferencia de imágenes de reflectancia en la banda espectral del infrarrojo cercano; banda espectral 4 en Landsat 5 TM y 7 ETM, banda espectral 5 en Landsat 8 OLI, d) diferencia de índice de vegetación NDVI y e) relación de imágenes de reflectancia.

En tercer lugar, a pesar de lo planteado en el ítem 2, el método seleccionado como de mayor exactitud corresponde a la diferencia de la Componente Principal N° 1; ya que el método de la diferencia del índice de brillo propuesto por Kauth y Thomas sobreestima las áreas de cambio/ningún cambio (Figuras 13 y 14); lo que puede ser debido a que los coeficientes de ajustes o las covarianzas en le regresión lineal multivariable son superiores a aquel de la Componente Principal N° 1.

Este aspecto puede ser debido a la influencia de las características locales de la región espectral como ángulos solares, condiciones atmosféricas, usos y coberturas terrestres sobre la cual se haya basado el ajuste de la ecuación propuesta por Kauth Thomas para Landsat MSS y sus modificaciones para adaptación a los sensores Landsat 5 TM (Crist y Kauth, 1986) y 7 ETM (Huang et al., 2002). Este aspecto es soportado debido a que la variable usada en la regresión lineal multivariable corresponde al número digital obtenido desde el espacio n-dimensional de las bandas espectrales de los satélites Landsat. Como es conocido, ésta es la variable primaria derivada desde las imágenes de los satélites Landsat; la cual no posee correcciones radiométricas, topográficas y atmosféricas.

En el caso de la componente N° 1 derivada de la imagen de reflectancia; las correcciones mencionadas han sido aplicadas sobre una escena local cuyos usos y coberturas son predominantemente de tipo vegetal; por lo que las reflectancias contenidas en las bandas espectrales de la región espectral infrarrojo son significativamente altas en relación al resto de las bandas espectrales. Esto conduce a que los coeficientes de dichas bandas espectrales sean los más altos en la regresión lineal multivariable de la Componente Principal N° 1 de cada imagen usada en la diferencia bitemporal.

En cuarto lugar, la diferencia de la Componente Principal N° 1 provee mayor información sobre la detección de cambios/ningún cambio en los usos y coberturas terrestres con respecto a la diferencia de las imágenes de reflectancia en la banda espectral del infrarrojo cercano. Esto es explicado por causa de que los coeficientes de regresión entre la reflectancia contenida en las bandas espectrales en la imagen Landsat y la Componente Principal N° 1 ha resultado como sigue: bandas espectrales espectrales: 1, 2 y 3: $r > 0.96$, bandas espectrales 4 y 5: $r > 0.76$ y banda espectral 7: $r > 0.86$; incluyendo la mayor parte de la varianza en dichas bandas espectrales; mientras que la diferencia de la banda espectral 4 de la imagen de reflectancia

bitemporal está limitada a la varianza de la reflectancia únicamente en dicha banda espectral. El resultado satisfactorio de los índices de exactitud en la detección de cambios para el método de la diferencia de imágenes de reflectancia en la banda espectral del infrarrojo cercano se debe a que la escena tiene coberturas y usos predominantemente de origen vegetal.

En quinto lugar, los métodos de relación y diferencia de índice de vegetación dan como resultados los índices de exactitud bajos en detección de cambios/ningún cambio en la cobertura y usos terrestres; inclinándose hacia detectar aquellas zonas de la misma posición geográfica en las imágenes bitemporales simultáneamente; dónde se dan sombras y nubes; cuerpos de agua clara y cuerpos de agua con sedimentos y fitoplancton; suelos agrícolas bajo riego y suelos agrícolas secos. Esto es explicado porque la reflectancia desde las superficies oscurecidas o de alta humedad; las cuales tienen una reflectancia $< 1\,\%$, como: sombras, cuerpos de agua clara y suelos regados es extremadamente baja; tendiendo a cero, comparada con la reflectancia de las zonas con: nubes, cuerpos de agua con sedimentos y fitoplancton, suelos agrícolas secos (Bojinski et al., 2004; Jensen, 2009; Karaska et al., 2004; Markham y Barker, 1985). Los métodos de detección de cambios/ningún cambio basados en la relación de imágenes de reflectancia y diferencia de imágenes de índice de vegetación son sensibles a altas diferencias de reflectancia.

Conclusiones

El método de postclasificación permite la intervención del investigador a través de una clasificación supervisada de los usos y coberturas de la tierra en la cuenca del río Pao; dando resultados satisfactorios con respecto a los índices de exactitud global e índice de Kappa derivados de la matriz de error que compara el mapa clasificado con la imagen de referencia; lo cual ha sido aplicado sobre once imágenes de los satélites Landsat 5TM, 7ETM y 8OLI. Posterior a la clasificación, una herramienta de superposición ha conducido a obtener la proporción de cambios en usos y coberturas de terreno bitemporal en el período 1986 a 2016; representada a través de una matriz de cambios. En términos de los propósitos de estimar cambios/ningún cambio en los usos y coberturas de la tierra; el método postclasificación sería la opción predominante sobre los métodos de preclasificación.

La categorización de los métodos de preclasificación en orden del más al menos exacto para la estimación de la proporción de áreas de cambio/ningún cambio bitemporal en las coberturas y usos terrestres en la cuenca del río Pao obtenida a partir de la matriz de error y el ajuste de los métodos a las características locales de la escena en la imagen del satélite Landsat dan como resultado: 1) análisis de componentes principales 2) diferencia de imágenes, 3) transformación Kauth-Thomas, 4) vector de cambio, 5) relación de imágenes, 6) diferencia de imágenes de índice de vegetación y 7) regresión de imágenes.

El método de detección de cambios de preclasificación con mayor capacidad para estimar cambios en el uso y cobertura del suelo fue el de componentes principales, utilizando la

componente No 1, comparado con el resto de métodos como la diferencia de imágenes, la relación de imágenes, la regresión de imágenes y el NDVI. Este método incluyó la mayor varianza en los valores de reflectancia en las regiones espectrales visible e infrarroja, en relación con el uso y la cobertura del suelo (agrícola, de pastizales y urbana, así como coberturas como agua, vegetación y suelo degradado). Este método puede complementarse con los métodos de relación de imágenes y de vector de cambio para lograr una mejor detección de los cambios asociados a una transformación de cobertura de agua a vegetación, y viceversa.

Referencias

Anderson, J., Hardy, E., Roach, J., y Witmer, R. (1976). *A land use and land cover classification system for use with remote sensor data* (USGS Professional Paper No. 964 N.º 3). U.S. Government Printing Office. https://doi.org/10.3133/pp964

Bojinski, S., Schläpfer, D., Schaepman, M., Keller, J., y Itten, K. (2004). Aerosol mapping over land with imaging spectroscopy using spectral autocorrelation. *International Journal of Remote Sensing*, *25*(22), 5025-5047. https://doi.org/10.1080/01431160410001719830

Chen, X., Chen, J., Shi, Y., y Yamaguchi, Y. (2012). An automated approach for updating land cover maps based on integrated change detection and classification methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *71*, 86-95. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.05.006

Crist, E., y Kauth, R. (1986). The Tasseled Cap de-mystified. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, *52*(1), 81-86.

Foody, G. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, *80*(3), 185-201. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00295-4

Giri, C., y Jenkins, C. (2005). Land cover mapping of Greater Mesoamerica using MODIS data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, *31*(4), 274-282. https://doi.org/10.5589/m05-018

Guerschman, J., Paruelo, J., y Burke, I. (2003). Land use impacts on the normalized difference vegetation index in temperate Argentina. *Ecological Applications*, *13*(3), 616-628. https://doi.org/10.1890/1051-0761(2003)013[0616:LUIOTN]2.0.CO;2

Guevara, E., y Cartaya, H. (1991). *Hidrología: Una introducción a la ciencia hidrológica aplicada*. Universidad de Carabobo.

Han, L., y Rundquist, D. (1997). Comparison of NIR/RED ratio and first derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration: A case study in a turbid reservoir. *Remote Sensing of Environment*, *62*(3), 253-261. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00106-5

Huang, C., Davis, L., y Townshend, J. (2002). An assessment of support vector machines for land cover classification. *International Journal of Remote Sensing*, *23*(4), 725-749. https://doi.org/10.1080/01431160110040323

Hussain, M., Chen, D., Cheng, A., Wei, H., y Stanley, D. (2013). Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. *ISPRS Journal*

of Photogrammetry and Remote Sensing, *80*, 91-106. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.03.006

Instituto Nacional de Estadística. (2011). *Proyección de población*. INE.

Jensen, J. (2009). *Remote sensing of the environment: An earth resource perspective (2nd ed.)* Pearson Education India.

Joseph, G. (2005). *Fundamentals of remote sensing*. Universities press.

Karaska, M., Huguenin, R., Beacham, J., Wang, M., Jensen, J., y Laufmann, R. (2004). AVIRIS measurements of chlorophyll, suspended minerals, dissolved organic carbon and turbidity in the Neuse River, NC. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, *70*(1), 125-133. https://doi.org/10.14358/PERS.70.1.125

Landis, J., y Koch, G. (1977). An application of hierarchical kappa-type statistics in the assessment of majority agreement among multiple observers. *Biometrics*, *33*(2), 363-374. https://doi.org/10.2307/2529786

López, N., Márquez, A., y Guevara, E. (2020). Change dynamics of land-use and land-cover for tropical wetland management. *Water Practice & Technology*, *15*(3), 632-644. https://doi.org/10.2166/wpt.2020.049

Markham, B., y Barker, J. (1985). Spectral characterization of the LANDSAT Thematic Mapper sensors. *International Journal of Remote Sensing*, *6*(5), 697-716. https://doi.org/10.1080/01431168508948492

Márquez, A., Guevara, E., y Rey, D. (2019). Hybrid model for forecasting of changes in land use and land cover using satellite techniques. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *12*(1), 252-273. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2885612

Megia, H., Peralta, C., Medrano, O., Palomeque, M., Ramos, R., y Galindo, A. (2025). Análisis de la cobertura y uso de suelo de la Cuenca Baja del Río Usumacinta mediante técnicas de teledetección. *Terra Latinoamericana*, *43*. https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v43i.2075

Obodai, J., Adjei, K., Odai, S., y Lumor, M. (2019). Land use/land cover dynamics using landsat data in a gold mining basin-the Ankobra, Ghana. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *13*, 247-256. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.10.007

Roy, A., y Inamdar, A. (2019). Multi-temporal Land Use Land Cover (LULC) change analysis of a dry semi-arid river basin in western India following a robust multi-sensor satellite image calibration strategy. *Heliyon*, *5*(4). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01478

Shawul, A., y Chakma, S. (2019). Spatiotemporal detection of land use/land cover change in the large basin using integrated approaches of remote sensing and GIS in the Upper Awash basin, Ethiopia. *Environmental Earth Sciences*, *78*(5), 141. https://doi.org/10.1007/s12665-019-8154-y

Singh, A. (1989). Review article: Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, *10*(6), 989-1003. https://doi.org/10.1080/01431168908903939

Sinha, P., y Kumar, L. (2013). Markov land cover change modeling using pairs of time-series satellite images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, *79*(11), 1037-1051. https://doi.org/10.14358/PERS.79.11.1037

Tadese, M., Kumar, L., Koech, R., y Kogo, B. (2020). Mapping of land-use/land-cover changes and its dynamics in Awash River Basin using remote sensing and GIS. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *19*, 100352. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100352

Tewabe, D., y Fentahun, T. (2020). Assessing land use and land cover change detection using remote sensing in the Lake Tana Basin, Northwest Ethiopia. *Cogent Environmental Science*, *6*(1), 1778998. https://doi.org/10.1080/23311843.2020.1778998

Townshend, T., Goff, T., y Tucker, C. (1985). Multitemporal Dimensionality of Images of Normalized Difference Vegetation Index at Continental Scales. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *GE-23*(6), 888-895. https://doi.org/10.1109/TGRS.1985.289474

Trodd, N. (1995). Uncertainty in land cover mapping for modelling land cover change. *Proceedings of RSS95: Remote Sensing in Action*, *19*, 1138-1145.

Twisa, S., y Buchroithner, M. (2019). Land-use and land-cover (LULC) change detection in Wami River Basin, Tanzania. *Land*, *8*(9), 136. https://doi.org/10.3390/land8090136

Yuan, F., Sawaya, K., Loeffelholz, B., y Bauer, M. (2005). Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, *98*(2–3), 317-328. https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.08.006

Zaraza, M., Upegui, E., y Espejo, O. (2022). Change Detection over mining areas using Deep Neural Networks from Planetscope image time series. *IEEE Latin America Transactions*, *20*(9), 2196-2205. https://doi.org/10.1109/TLA.2022.9878176

Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL)
Revista Electrónica Conocimiento Libre y Licenciamiento (CLIC), Mérida – Venezuela
ISSN: 2244-7423

Desarrollo de un mecanismo de ensayos mecánicos para determinar deformaciones en materiales mediante galgas extensiométricas

Desenvolvimento de um mecanismo para ensaios mecânicos destinado a determinar deformações em materiais através de extensómetros

Development of a mechanism for mechanical testing to determine deformations in materials using strain gauges

Jesús Araque [1]
Miguel Palmera [2]
José Materán [3]
Ana Velaquéz [4]
Miguel Contreras [5]
Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela[1,3]
Centro Nacional de Tecnologías Ópticas, Mérida, Venezuela[1,2,3,4,5]
Centro de Investigaciones de Astronomía y Tecnologías Aplicadas Francisco J. Duarte, Mérida, Venezuela[1,2,3,4,5]
jda2903@gmail.com[1]
migpald@gmail.com[2]
jmateran1986@gmail.com[3]
anita.velasquezv@gmail.com[4]
miguelcontreras06@gmail.com[5]

Fecha de recepción: 14/04/2026
Fecha de aceptación: 15/09/2026
Pág: 39 – 54
DOI: 10.5281/zenodo.23810132

Resumen

En este estudio se desarrolló un mecanismo para ensayos mecánicos diseñado para medir deformaciones en materiales metálicos (aceros ASTM A36) bajo cargas controladas.

Esta obra está bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0.

A partir del análisis de requisitos técnicos y funcionales, se estableció un marco metodológico que integró un modelado tridimensional (CAD), simulaciones estructurales mediante el método de elementos finitos (MEF) en ANSYS y el desarrollo de planos de fabricación detallados. La validación del sistema se realizó mediante simulaciones y experimentalmente con galgas extensiométricas. Los resultados arrojaron módulos de Young de 201.19 GPa y 194.06 GPa para dos probetas, con intervalos de confianza del 95 % confirmando la precisión del sistema. Finalmente, se destaca la versatilidad del dispositivo y su compatibilidad con otras técnicas de medición de ensayos mecánicos, como la Interferometría Speckle Digital.

Palabras clave: deformación, diseño de mecanismo, ensayos y propiedades mecánicas, galgas extensiométricas.

Resumo

Neste estudo, desenvolveu-se um mecanismo para ensaios mecânicos projetado para medir deformações em materiais metálicos (aços ASTM A36) sob cargas controladas. A partir da análise de requisitos técnicos e funcionais, estabeleceu-se uma estrutura metodológica que integrou modelagem tridimensional (CAD), simulações estruturais pelo método de elementos finitos (MEF) no ANSYS e o desenvolvimento de desenhos de fabricação detalhados. A validação do sistema foi realizada por meio de simulações e experimentalmente com extensômetros. Os resultados indicaram módulos de Young de 201,19 GPa e 194,06 GPa para dois corpos de prova, com intervalos de confiança de 95%, confirmando a precisão do sistema. Por fim, destaca-se a versatilidade do dispositivo e sua compatibilidade com outras técnicas de medição em ensaios mecânicos, como a Interferometria Speckle Digital.

Palavras-chave: deformação, projeto de mecanismo, ensaios e propriedades mecânicas, extensômetros.

Abstract

This study presents the development of a mechanical testing apparatus designed to measure deformations in ASTM A36 steel under controlled loading conditions. Based on technical and functional requirement analysis, a methodological framework was established, integrating 3D modeling (CAD), structural simulations via Finite Element Analysis (FEA) in ANSYS, and detailed manufacturing blueprints. The

system was validated through theoretical simulations and experimental testing using strain gauges. The results yielded Young's moduli of 201.19 GPa and 194.06 GPa for two specimens, with 95% confidence intervals confirming the system's precision. Furthermore, this mechanism exhibits versatility and compatibility with advanced optical techniques, such as Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI), are highlighted.

Keywords: strain, mechanism design, mechanical properties and testing, strain gauges.

Introducción

En el ámbito de la ingeniería y la investigación científica, la caracterización precisa de materiales es fundamental para comprender su comportamiento mecánico bajo diversas condiciones de carga. Estos estudios son especialmente relevantes en sectores industriales, de construcción e innovación tecnológica, donde el diseño y la validación de componentes dependen directamente de la calidad, integridad y fiabilidad de los materiales utilizados (JIS College of Engineering, 2017; Suárez, 2017).

Las propiedades mecánicas definen el comportamiento del material cuando es sometido a esfuerzos, tratamientos mecánicos externos o gradientes de temperatura, ya sean de origen ambiental o por acción humana. Generalmente estas propiedades se miden a partir de pruebas experimentales que deforman al material, alterando su estructura interna e incluso provocando su fractura (Rodríguez, 2018). Estas propiedades pueden determinarse mediante ensayos mecánicos destructivos, como son la tensión, compresión y flexión, o a través de ensayos que utilizan sustancias químicas, impactos, fuego, etc. (J. Gómez, 2015; Torres y Redondo, 2009). Por otro lado, existen experimentos en donde el material no sufre modificaciones o daños y estas pruebas se conocen como ensayos no-destructivos, en estos ensayos se utilizan métodos físicos como por ejemplo rayos X, inducción de corriente y ópticos (Martínez, 2017).

El conocimiento detallado de estas propiedades permite realizar una selección de materiales basada en criterios técnicos objetivos. Este enfoque no solo simplifica el proceso de elección, sino que también garantiza que los materiales se adapten a las exigencias específicas de cada aplicación, ya sea en el diseño de piezas sometidas a cargas dinámicas o en la fabricación de estructuras que requieran alta estabilidad (Ashby y Johnson, 2013). Además, al considerar factores como el entorno operativo (temperatura, corrosión, fatiga) y los requerimientos de vida útil, se optimiza el rendimiento y la seguridad de los componentes. De esta forma, se reduce el riesgo de fallas prematuras y se contribuye a la eficiencia en costos de producción y

mantenimiento.

Así, se tuvo como objetivo desarrollar un mecanismo que permita la aplicación de cargas controladas de tracción y compresión en probetas de acero ASTM A36, con el fin de generar esfuerzos en el rango elástico y cuantificar las deformaciones resultantes para determinar las propiedades mecánicas del material mediante galgas extensiométricas. Para ello, se realizó un estudio exhaustivo de los requerimientos técnicos y funcionales necesarios para el mecanismo, considerando las condiciones de ensayo, el material de estudio y la futura integración con otras técnicas de ensayos mecánicos no-destructivos, se definieron los parámetros del diseño, tales como dimensiones, capacidad de carga, precisión y rango de desplazamiento del mecanismo, a partir de los requerimientos determinados. Además, se hizo el diseño y modelado del sistema mecánico, incluyendo todos sus componentes y sistemas de sujeción de probetas, aplicación de cargas y medición de deformaciones. Y para finalizar, se hicieron simulaciones numéricas para validar el diseño del mecanismo y evaluar su comportamiento bajo las condiciones de carga previstas.

Galgas extensiométricas

Las galgas extensiométricas son sensores ampliamente utilizados en ensayos de tracción para medir la deformación local en un material (Hoffmann, 1989). Estas galgas consisten en una delgada lámina de material conductor que se adhiere a la superficie de la probeta. Cuando la probeta se deforma debido a la aplicación de una fuerza, la galga también se deforma, lo que provoca un cambio en su resistencia eléctrica. Este cambio en la resistencia es proporcional a la deformación sufrida por el material y se mide utilizando un circuito de puente de Wheatstone (L. Gómez, 2020). La relación entre el cambio en la resistencia (δR) y la deformación medida por la galga extensométrica (ε_g) está dada por la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_g = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{GF} \tag{1}$$

Donde:

- ε_g: es la deformación medida por la galga.
- δR: es el cambio en la resistencia de la galga.
- R: es la resistencia inicial de la galga.
- GF: es el factor de galga, este factor es una constante que depende de las propiedades del material y de su diseño depende la sensibilidad del sensor.

Una de las mayores ventajas de las galgas extensiométricas es su alta precisión para medir deformaciones en puntos muy específicos, lo que las hace ideales para estudios detallados de concentración de tensiones o para materiales que presentan comportamientos anisotrópicos.

Además, es posible aplicar configuraciones de galgas en forma de "roseta", lo que permite medir deformaciones en múltiples direcciones simultáneamente, proporcionando una imagen completa de la distribución de esfuerzos en la probeta.

Sin embargo, las galgas extensiométricas también presentan algunas limitaciones. Por un lado, requieren una cuidadosa preparación de la superficie y una adhesión precisa para garantizar que la deformación medida sea representativa del comportamiento del material (L. Gómez, 2020). Además, suelen ser desechables, ya que es difícil reutilizarlas después de un ensayo tienen un rango limitado de deformación, lo que significa que no son adecuadas para materiales que experimenten grandes elongaciones antes de la fractura.

Cálculos de elementos mecánicos

En el desarrollo del mecanismo de ensayos de tracción, la toma de decisiones técnicas resultó determinante para garantizar la viabilidad de este trabajo. Se consideraron aspectos claves como la selección del tipo de probeta y su tamaño, la capacidad de carga máxima requerida, los sistemas de medición para la obtención de datos precisos, y la facilidad de fabricación y disponibilidad de componentes (Shigley y Mischke, 2004). Asegurando que el diseño propuesto pudiera ser implementado de manera efectiva y dentro de las limitaciones de costos y materiales.

Los cálculos realizados se basan en las metodologías establecidas en el libro "Diseño de elementos de máquinas" de Mott (2004), una referencia fundamental en el diseño y análisis mecánico. Se emplearon herramientas de software, como MD Solids 4.0 y Catálogo SKF, para verificar y complementar los cálculos manuales. A continuación, se describen las principales fórmulas utilizadas y sus aplicaciones específicas.

Esfuerzos axiales

Para determinar los esfuerzos axiales en elementos sometidos a tracción.

$$F = \sigma \cdot A \tag{2}$$

Donde:

- F: Fuerza axial aplicada
- σ: Esfuerzo axial permitido
- A: Área transversal del elemento

Esta fórmula se utilizó en el diseño de tornillos y ejes, asegurando que las secciones sean capaces de resistir las cargas aplicadas sin fallar.

Análisis de vigas

Para el análisis de vigas sometidas a cargas, se empleó el software MD Solids para obtener diagramas de:

- Reacciones en los apoyos.
- Fuerzas cortantes ($V(x)$)
- Momento flector ($M(x)$)
- Deflexión ($\delta(x)$)

Los resultados permitieron evaluar la rigidez y seguridad de los elementos estructurales del sistema. Se utilizó la ecuación diferencial del eje elástico:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{E \cdot I} \tag{3}$$

Donde:

- $M(x)$: Momento flector en función de x.
- E: Módulo de elasticidad.
- I: Momento de inercia de la sección

Esfuerzos en flexión pura

Para elementos sometidos a flexión:

$$\sigma_f = \frac{M(x) \cdot C}{I} \tag{4}$$

Donde:

- σ_f: Esfuerzo normal debido a flexión.
- $M(x)$: Momento flector máximo
- C: Distancia al eje neutro sección.
- I: Momento de inercia

Factor de seguridad

El factor de seguridad se calcula para asegurar la integridad del diseño mediante la relación entre el esfuerzo admisible del material y el esfuerzo real calculado bajo las cargas aplicadas:

$$FS = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{real}} \tag{5}$$

Donde:

- σ_{adm}: Esfuerzo admisible (o permisible) del material.
- σ_{real}: Esfuerzo real o de trabajo calculado bajo las cargas aplicadas.

Esfuerzo de tornillos y roscas

Para tornillos sometidos a cargas axiales:

$$\sigma_y = \frac{P}{A_t} \tag{6}$$

Donde:

- P: Carga Axial
- A_t: Área efectiva de la rosca.

El cálculo del torque necesario se realizó considerando tanto la relación general de transmisión de potencia como las características geométricas del sistema:

$$T = \frac{P}{A_t} \tag{7}$$

Adicionalmente, el torque (T) requerido para vencer la carga axial incorporando el efecto de la fricción y el ángulo de avance se determinó mediante la expresión:

$$T = \left(F \cdot \frac{D_p}{2}\right) \cdot \left[\frac{cos(\phi) \cdot tan(\lambda) + f}{cos(\phi) - f \cdot tan(\lambda)}\right] \tag{8}$$

Donde:

- T: Torque necesario.
- F: Fuerza axial.
- D_p: Diámetro de paso de la rosca
- ϕ: Ángulo de la rosca.
- λ: Ángulo de avance.
- f: Coeficiente de fricción.

Selección de rodamientos

Se emplearon las fórmulas del catálogo SKF para calcular las cargas equivalentes y determinar los modelos adecuados de rodamientos:

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \tag{9}$$

Donde:

- P: Carga equivalente.
- F_r: Carga radial.
- F_a: Carga axial.
- X, Y: Factores de carga específicos del tipo de rodamiento.

El software proporcionó datos adicionales como lo son las velocidades y condiciones límite para garantizar un diseño funcional.

Velocidades de ensayo

Calculadas según la norma ASTM E8/E8M:

$$V = C \cdot G \tag{10}$$

Donde:

- C: Constante normativa.
- G: Longitud calibrada de la probeta.

Modelado en 3D

Modelado en software CAD

Para el modelado 3D del mecanismo de ensayo se utilizó el software Autodesk Inventor. Este software de diseño mecánico 3D avanzado, ofrece un conjunto completo de herramientas para el desarrollo de productos, que van desde el diseño conceptual hasta la fabricación.

Este destaca por su capacidad para crear modelos paramétricos altamente detallados y complejos. Sus funcionalidades incluyen modelado de sólidos y superficies, diseño de ensamblajes grandes con miles de componentes, simulación de movimientos y análisis de esfuerzos integrados. El proceso de modelado 3D en Inventor incluye las siguientes etapas:

1. Creación de bocetos 2D para definir la geometría básica de las piezas.

2. Generación de sólidos 3D mediante operaciones como extrusión, revolución, barrido y soleado.

3. Creación de ensamblajes mediante la combinación de diferentes piezas y definición de restricciones entre ellas.

4. Verificación de interferencias y análisis de movimiento para asegurar el correcto funcionamiento del mecanismo.

A continuación, se muestra un bosquejo de diseño simplificado el prototipo de ensayo de tracción (ver Figura 1). Se muestran las mordazas, las cuales sujetan la probeta al centro del sistema. A la derecha, se observa la Prensa expeller, que se conecta a una celda de carga. La placa al final del sistema actúa como un soporte fijo para la mordaza estática. Todo el sistema se encuentra montado sobre la mesa representada en la parte inferior, la cual sostiene toda la estructura y asegura la estabilidad del ensayo.

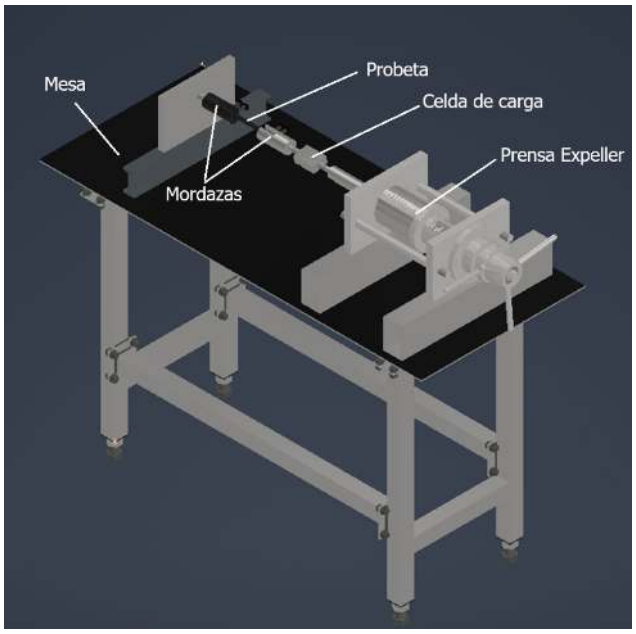


Figura 1: Bosquejo del diseño del prototipo de la máquina de ensayo en ANSYS.
Fuente: Elaboración propia (2026).

Análisis de Elementos Finitos (FEA)

El Análisis de Elementos Finitos (FEA) es una técnica numérica utilizada para predecir el comportamiento de estructuras y componentes bajo diferentes condiciones de carga y restricciones. Se basa en la división de un sistema complejo en pequeñas partes denominadas elementos finitos, que están conectados entre sí por puntos llamados nodos. Cada elemento

tiene propiedades específicas que representan el comportamiento del material y las cargas a las que está sometido. El proceso de mallado es un paso fundamental en el FEA, ya que consiste en la discretización de la geometría en una red de elementos finitos, generalmente tetraédricos o hexaédricos en el caso de análisis tridimensionales. Para el análisis FEA del mecanismo de ensayo, se empleó el software ANSYS (ver Figura 2). Herramienta líder en simulación que abarca múltiples disciplinas, incluyendo análisis estructural, térmico, dinámico, y multifísico. En este proyecto, se utilizó el módulo de análisis estructural estático, adecuado para velocidades bajas y condiciones de carga constantes.

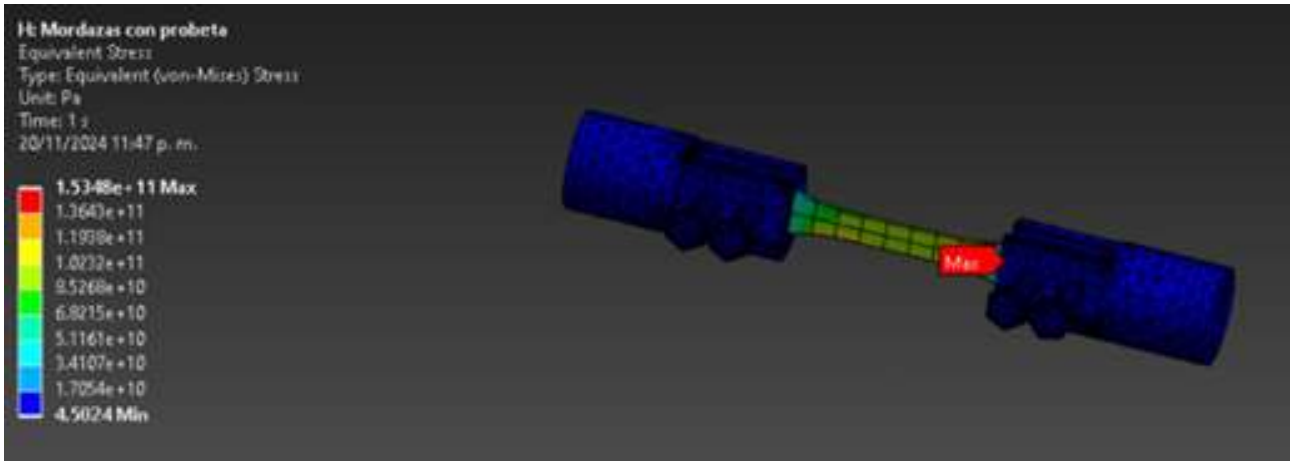


Figura 2: Vista general del modelo mallado y configuración de contactos en ANSYS para la prueba preliminar de transmisión de cargas.
Fuente: Elaboración propia (2026).

Diseño electrónico para la adquisición de datos

El sistema de instrumentación requirió un diseño de circuito que permita conectar de manera eficiente los sensores al Arduino asegurando que todos los dispositivos puedan funcionar simultáneamente. Para ello, el circuito se implementó sobre un protoboard donde se realizaron las conexiones principales y la validación de la estabilidad eléctrica de la señal (como se muestra en la Figura 3). El Arduino proporciona la alimentación de 5V, 3.3V y GND, que se distribuyen a los diferentes módulos y sensores conectados al protoboard, permitiendo integrar los dispositivos de medición y garantizando la compatibilidad de voltajes y corrientes entre los componentes.

Programación de Arduino

La programación del Arduino fue clave para la adquisición y procesamiento de los datos recolectados por los sensores durante los ensayos. Se implementó un programa que integre las librerías necesarias para interactuar con los diferentes módulos y sensores, como la biblioteca HX711 para la celda de carga y las galgas extensiométricas. Este programa permitió la lectura

simultánea de los valores de fuerza aplicada, desplazamiento y deformación en tiempo real, los cuales se visualizarán en una interfaz de la computadora.

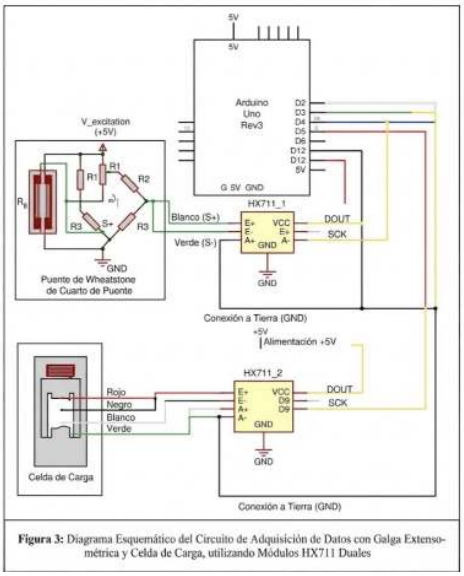


Figura 3: Montaje del circuito completo Arduino con sensores y módulos.
Fuente: Elaboración propia (2026).

Integración de sensores

La integración de los sensores constituyó uno de los aspectos clave del sistema de instrumentación. Cada sensor se conectó de manera adecuada al Arduino y operó de forma coordinada con los demás. A continuación, se describen brevemente los sensores que se integraron en el sistema y su función específica en el ensayo de tracción:

- **Celda de carga:** La celda de carga fue el dispositivo encargado de medir la fuerza aplicada durante el ensayo de tracción. Se conectó a un módulo HX711, el cual ejecutó la amplificación de la señal mediante su PGA interno y la conversión analógica-digital (ADC de 24 bits) para generar los datos digitales procesados por el Arduino. El convertidor A/D se configuró con una tasa de adquisición de 80 muestras por segundo (SPS) para optimizar el muestreo. Asimismo, se aplicó un filtro digital de media móvil a nivel de código para atenuar el ruido de alta frecuencia. La integración de este elemento permitió obtener lecturas precisas de la fuerza ejercida sobre la probeta en tiempo real.

- **Galgas extensiométricas:** Estas midieron las deformaciones en la probeta. Las galgas se configuraron en un puente de Wheatstone, el cual realizó la conversión de los cambios de resistencia mecánica a diferencia de potencial (voltaje). Luego, un segundo módulo HX711 procesó e integró estas señales (empleando también su amplificador interno y

conversión A/D a 80 SPS con filtrado digital para suprimir perturbaciones transitorias), permitiendo que el Arduino obtuviera lecturas estables y precisas de las deformaciones experimentadas por la probeta durante el ensayo.

Selección del tipo de probeta y tamaño

En el presente trabajo, se seleccionaron probetas planas tipo Sheet de acuerdo con la norma ASTM E8/E8M-22 (American Society for Testing and Materials, 2022). Aunque la probeta tipo Plate ofrece ventajas en términos de dimensiones nominales mayores, el esfuerzo mecánico requerido para deformarla superaba la capacidad de accionamiento del mecanismo manual desarrollado. Por el contrario, la probeta tipo Sheet proporcionó un óptimo equilibrio entre la capacidad de carga de la celda utilizada, la precisión de medición y la facilidad de fabricación, constituyéndose como la opción adecuada para este proyecto. La capacidad de carga máxima del sistema de ensayos garantizó que el primer elemento en fallar durante los ensayos fuera la probeta y no los componentes estructurales del sistema ni la celda de carga, protegiendo este último elemento de sobrecargas y asegurando que operara dentro de sus límites de diseño.

A continuación, se detalla el diagrama esquemático de la geometría de la probeta (ver Figura 4) y los valores de sus parámetros principales en la Tabla 1.

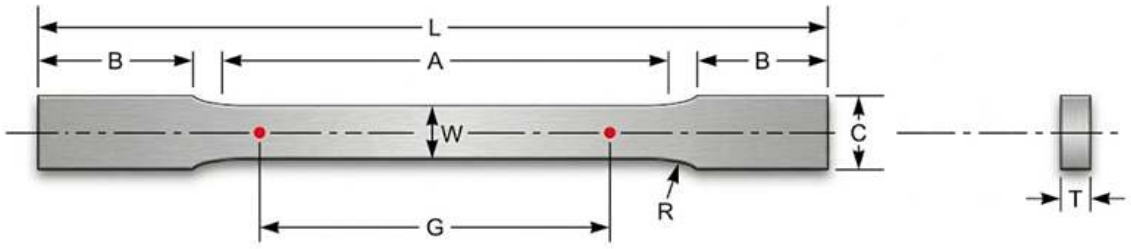


Figura 4: Diagrama de una probeta estándar mostrando el largo de la sección reducida (A) largo del área de sujeción (B), ancho del área de sujeción (C), el radio de curvatura (R), la longitud calibrada (G), la sección transversal (W), longitud total de la probeta (L) grosor de la probeta (T).

Fuente: American Society for Testing and Materials (2022).

Tabla 1: Dimensiones de la probeta plana según la norma ASTM E8/E8M-22.

A	B	C	R
60 mm	50 mm	20 mm	125 mm
G	W	L	T
50 mm	12.5 mm	200 mm	3 mm

Fuente: Elaboración propia (2026).

Para la conversión de fuerza a esfuerzo nominal, se calculó el área transversal inicial mediante la expresión $A_0 = W \times T$, empleando el espesor nominal T de la placa de acero ASTM A36 y la medición exacta del ancho W con su respectiva tolerancia.

Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos sobre las probetas de acero ASTM A36. Se desarrolló un estudio comparativo entre las mediciones experimentales capturadas mediante galgas extensométricas, los valores teóricos del Módulo de Young y las respuestas estructurales derivadas de las simulaciones numéricas en ANSYS, considerando la sección transversal nominal de 37.5 mm^2 (W = 12.5 mm, T = 3.0 mm) declarada en la Tabla 1. Las validaciones numéricas confirmaron que los esfuerzos inducidos se mantuvieron estrictamente dentro del régimen elástico del material.

La Figura 5 muestra el comportamiento de esfuerzo frente a deformación porcentual para la Probeta 1 a lo largo de tres ensayos consecutivos.

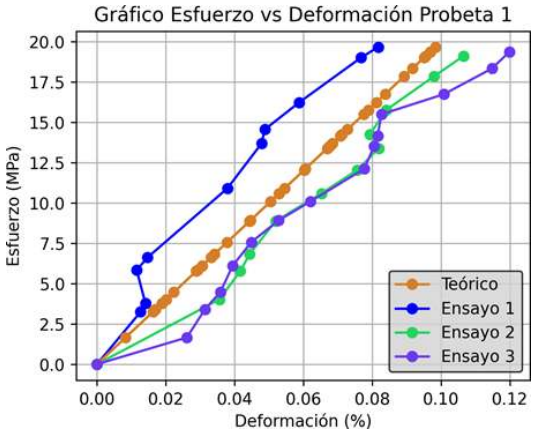


Figura 5: Gráfico de esfuerzo-deformación para la probeta 1.
Fuente: American Society for Testing and Materials (2022).

Se observó un cambio de pendiente anómalo en la región inicial (comprendida entre 0 y 7.5 *MPa*), el cual se atribuyó al micro-asentamiento inicial y a la eliminación de holguras mecánicas en las mordazas del banco de pruebas accionado manualmente, previo al acoplamiento firme de la celda de carga. Superado este transitorio de alineación, la curva adoptó una tendencia lineal estable que permitió evaluar la rigidez del material.

Por su parte, la Figura 6 presenta el registro de esfuerzo frente a deformación porcentual correspondiente a la Probeta 2 bajo las mismas condiciones experimentales, evaluada mediante tres corridas independientes en rango elástico. Los pequeños retrocesos o inversiones en la deformación observados entre 15 y 20 *MPa* se atribuyen principalmente a la naturaleza del

accionamiento manual de la prensa, el cual es susceptible a micro-deslizamientos mecánicos, juego en los elementos de transmisión y ligeras fluctuaciones en el esfuerzo de operación del banco de pruebas antes de estabilizar la transferencia de carga.

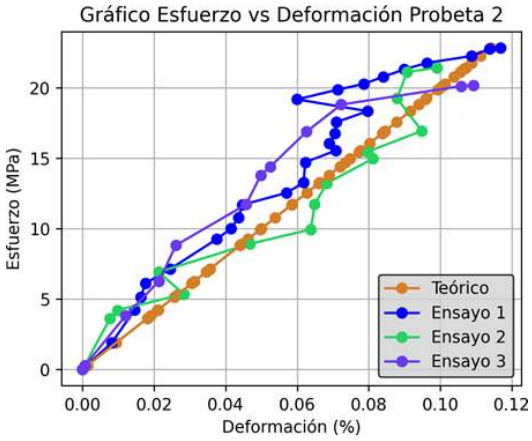


Figura 6: Gráfico de esfuerzo-deformación para la probeta 2.
Fuente: American Society for Testing and Materials (2022).

Cálculo del módulo de Young

Para el cálculo del módulo de Young, se realizó mediante una regresión lineal aplicada a los datos esfuerzo-deformación en la región elástica con su respectivo el error. Los cálculos para las probetas 1 y 2 se mostrarán en las Tablas 2 y 3:

Tabla 2: Cálculos para el Módulo de Young para la probeta 1.

Ensayo	Módulo de Young (GPa)	±Error (GPa)
1	236.70	1.20
2	190.50	0.84
3	176.49	0.96

Fuente: Elaboración propia (2026).

Tabla 3: Cálculos para el Módulo de Young para la probeta 2.

Ensayo	Módulo de Young (GPa)	±Error (GPa)
1	204.10	1.70
2	186.80	1.70
3	191.30	2.10

Fuente: Elaboración propia (2026).

Para evaluar la precisión de los ensayos realizados y analizar la consistencia de los valores del módulo de Young obtenidos mediante los ensayos, se hizo el cálculo de los intervalos de confianza para cada probeta con un nivel de confianza del 95 % (Tabla 4). Esto permite identificar la variabilidad de los datos y estimar el rango probable donde se encuentra el verdadero valor del módulo de Young.

Tabla 4: Cálculo del intervalo de confianza

Probeta	Media	Desviación estándar	Límite inferior	Límite superior	Nivel de confianza
1	201.23	31.45	123.07	279.31	95 %
2	194.06	9.00	171.68	216.40	95 %

El módulo de Young promedio para la probeta 1 fue de 201.23 *GPa*, mientras que para la probeta 2 se obtuvo un valor de 194.07 *GPa*. La probeta 1 presentó una dispersión considerablemente mayor ($\sigma = 31.45$ GPa) en comparación con la probeta 2 ($\sigma = 9.00$ GPa), lo cual puede estar asociado a heterogeneidades en la superficie del material o a variaciones en el acabado de dicha probeta durante la preparación de los ensayos.

Conclusiones

Se desarrolló y validó con éxito un mecanismo innovador para la aplicación controlada de cargas de tracción y compresión en acero ASTM A36. Este dispositivo, diseñado tras un exhaustivo análisis de requisitos técnicos y funcionales, permite generar esfuerzos en el régimen elástico, posibilitando la caracterización precisa de propiedades mecánicas mediante galgas extensométricas. La validación experimental, utilizando galgas extensiométricas, arrojó valores promediodel módulo de Young de 201.23 *GPa* y 194.06 *GPa* para dos probetas, con intervalos de confianza del 95 %, demostrando la alta repetibilidad y fiabilidad del mecanismo.

La elaboración de planos detallados y un protocolo experimental estandarizado garantizan su reproducibilidad, mientras que su versatilidad permite la integración con técnicas avanzadas como la interferometría speckle digital, ampliando significativamente su aplicabilidad en la mecánica de materiales. Este trabajo proporciona una solución robusta y metodológicamente sólida para la caracterización mecánica, estableciendo un marco de referencia para futuras investigaciones que busquen correlacionar datos mecánicos con técnicas ópticas de alta resolución en áreas tan diversas como estudios de fatiga y análisis de tensiones residuales.

Referencias

American Society for Testing and Materials. (2022). *Standard test methods for tension testing of metallic materials (E8/E8M)*. https://www.astm.org/Standards/E8.htm

Ashby, M., y Johnson, K. (2013). *Materials and design: the art and science of material selection in product design*. Butterworth-Heinemann.

Gómez, J. (2015). *Diseño, construcción y validación de una máquina para ensayos de resistencia de materiales*. Universidad de Córdoba, Montería, Colombia.

Gómez, L. (2020). *Montaje y calibración de un sistema de galgas extensiométricas para la medición de deformaciones en estructuras metálicas* [Tesis de grado]. Universidad de Almería.

Hoffmann, K. (1989). *An introduction to measurements using strain gages (No. BOOK)*. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik.

JIS College of Engineering. (2017). *Strength of Materials Lab*. Department of Mechanical Engineering. https://www.jiscollege.ac.in/me/pdf/som-lab.pdf

Martínez, J. (2017). *Prototipo de una máquina de ensayo en compresión para el estudio mecánico de probetas por medio de interferometría holográfica digital* [Tesis de Maestría]. Centro de Investigaciones en Óptica.

Mott, R. (2004). *Diseño de elementos de máquinas (4ta ed.)* Pearson Prentice Hall.

Rodríguez, A. (2018). *Diseño y construcción de una máquina de ensayos de 10 toneladas* [Tesis de grado]. Universidad César Vallejo, Trujillo, Perú.

Shigley, J., y Mischke, C. (2004). *Diseño en ingeniería mecánica (8va ed.)* McGraw-Hill.

Suárez, R. (2017). *Propiedades mecánicas de los materiales metálicos*. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

Torres, J., y Redondo, J. (2009). Reparación y automatización de una máquina universal de ensayos. *Ciencia e Ingeniería*, *30*(2), 171-179.

Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL)
Revista Electrónica Conocimiento Libre y Licenciamiento (CLIC), Mérida – Venezuela
ISSN: 2244-7423

Gale, una biblioteca de Python para enseñar programación de videojuegos

Gale, uma biblioteca Python para ensinar programação de videogames

Gale, a Python library for teaching video game programming

Alejandro Mujica [1]
Jesús Pérez [2]
Daniella Zambrano [3]
José Farías [4]
Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela[1,2,3,4]
alejandromujica@ula.ve[1]
jesuspangulo@ula.ve[2]
daniellaz@ula.ve[3]
jfarias@ula.ve[4]

Fecha de recepción: 08/07/2026
Fecha de aceptación: 30/09/2026
Pág: 55 – 75
DOI: 10.5281/zenodo.23810878

Resumen

La enseñanza de programación de videojuegos exige que los estudiantes comprendan mecanismos internos sin dedicar cada proyecto a reconstruir toda la infraestructura del juego. Los motores comerciales resuelven mediante editores visuales mecanismos que un curso de Ingeniería de Sistemas busca hacer explícitos en el código. Este artículo presenta un estudio documental descriptivo sobre Gale (acrónimo de *Game Architecture & Logic Engine*), una biblioteca de código abierto en Python sobre Pygame, mantenida para la enseñanza de la programación de videojuegos. Se ha utilizado, en el Departamento de Computación de la Escuela de Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Los Andes, para impartir la asignatura electiva Programación de Videojuegos 1, que este artículo documenta como caso de estudio. Se describe la organización modular de Gale y los patrones de diseño que materializa.

Esta obra está bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0.

La unidad de análisis es cada proyecto práctico entregado por los estudiantes; la importación explícita de un submódulo de Gale se usó como criterio inicial de localización, y para cada módulo localizado se verificó además evidencia explícita de uso en el código, más allá de la sola sentencia de importación. Se caracteriza así la correspondencia, verificada contra el código fuente, entre el programa oficial de la asignatura y los módulos de Gale que sus ocho proyectos prácticos importan y usan efectivamente, entre ellos el bucle de juego, los estados, la animación, los mapas y la física. El análisis identifica una organización modular en la que los proyectos reutilizan componentes comunes y añaden módulos según sus objetivos técnicos.

Palabras clave: alineación curricular, arquitectura de motores de juego, biblioteca de software educativa, enseñanza de la programación, patrones de diseño.

Resumo

O ensino de programação de jogos eletrônicos exige que os estudantes compreendam mecanismos internos sem dedicar cada projeto à reconstrução de toda a infraestrutura do jogo. Motores comerciais resolvem, por meio de editores visuais, mecanismos que um curso de Engenharia de Sistemas busca tornar explícitos no código. Este artigo apresenta um estudo documental descritivo sobre o Gale (acrônimo de *Game Architecture & Logic Engine*), uma biblioteca de código aberto em Python baseada no Pygame, mantida para o ensino de programação de jogos. Ela tem sido utilizada no Departamento de Computação da Escola de Engenharia de Sistemas da Universidade de Los Andes para ministrar a disciplina eletiva Programação de Jogos 1, a qual este artigo documenta como estudo de caso. Descrevem-se a organização modular do Gale e os padrões de projeto que ele implementa. A unidade de análise é cada projeto prático entregue pelos estudantes; a importação explícita de um submódulo do Gale foi utilizada como critério inicial de localização e, para cada módulo localizado, verificou-se também a evidência explícita de uso no código, além da simples instrução de importação. Caracteriza-se, assim, a correspondência — verificada no código-fonte — entre o programa oficial da disciplina e os módulos do Gale que seus oito projetos práticos importam e utilizam efetivamente, incluindo o game loop (loop do jogo), estados, animação, mapas e física. A análise identifica uma organização modular na qual os projetos reutilizam componentes comuns e adicionam módulos de acordo com seus objetivos técnicos.

Palavras-chave: alinhamento curricular, arquitetura de motores de jogos, biblioteca de software educacional, ensino de programação, padrões de projeto.

Abstract

In teaching video game programming, students must understand internal mechanisms without devoting every project to rebuilding the game's entire infrastructure. Commercial engines resolve mechanisms through visual editors that a Systems Engineering course seeks to make explicit in code. This paper presents a descriptive documentary study of Gale (an acronym for Game Architecture & Logic Engine), an open-source Python library built on Pygame, maintained for teaching video game programming. It has been used, in the Computer Science Department of the School of Systems Engineering at Universidad de Los Andes, to teach the elective course Video Game Programming 1, which this paper documents as a case study. It describes Gale's modular organization and the design patterns it embodies. The unit of analysis is each practical project submitted by students; an explicit import of a Gale submodule was used as the initial localization criterion, and for each module located, explicit evidence of use in the code was additionally verified, beyond the import statement alone. It thus characterizes the correspondence, verified against the source code, between the course's official syllabus and the Gale modules that its eight practical projects import and effectively use, including the game loop, states, animation, maps, and physics. The analysis identifies a modular organization in which the projects reuse common components and add modules according to their technical objectives.

Keywords: curricular alignment, design patterns, educational software library, game engine architecture, programming education.

Introducción

La programación de videojuegos integra contenidos que un plan de estudios de Ingeniería de Sistemas suele enseñar por separado, como estructuras de datos, algoritmos, arquitectura de software y matemáticas para gráficos. La herramienta con la que se construyen esos videojuegos puede influir, sin embargo, en los contenidos y mecanismos que quedan visibles para el estudiante. Cómo una máquina de estados finitos organiza el comportamiento de un personaje (Nystrom, 2014), cómo se estructura un bucle de juego dentro de la jerarquía de subsistemas de un motor (Gregory, 2019) o cómo un sistema de partículas gestiona su propio ciclo de vida (Nystrom, 2014) son decisiones de diseño que un curso de Ingeniería de Sistemas busca que el estudiante examine, además de usar.

Los motores comerciales de propósito general resuelven bien el problema de producir un videojuego, pero no se diseñaron principalmente como bibliotecas pedagógicas para enseñar programación, sino como plataformas de producción. Unity expone su funcionalidad mediante un editor visual y un modelo de componentes en C#, pensado para producir contenido en dos y tres dimensiones sin exigir programación gráfica de bajo nivel (Unity Technologies, 2026). Unreal Engine, de Epic Games, ofrece un motor de alta fidelidad gráfica con dos vías de programación, C++ y el lenguaje visual Blueprint, documentado como un entorno integral de producción (Epic Games, 2026). Godot es software libre y su motor puede inspeccionarse por completo, pero organiza el proyecto mediante un árbol de nodos y escenas del editor y su propio lenguaje de *scripting*, GDScript (Godot Engine, 2026). En estos entornos, buena parte de la infraestructura del juego se configura mediante editores, escenas, componentes o marcos de ejecución ya provistos. Esta caracterización se apoya en documentación oficial de cada motor. Por ello, un curso centrado en patrones de diseño y estructuras internas debe complementar el uso del motor con actividades que hagan explícitos esos mecanismos.

Gale surge de esta necesidad como una iniciativa de código abierto desarrollada en Python sobre Pygame, diseñada para reutilizarse en la enseñanza de programación de videojuegos. Se ha utilizado en el Departamento de Computación de la Escuela de Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Los Andes, para impartir la asignatura electiva Programación de Videojuegos 1. Aunque el análisis se centra en Programación de Videojuegos 1, la organización modular de Gale no incorpora dependencias específicas de esa asignatura: sus módulos pueden reutilizarse en otros cursos que aborden programación de videojuegos, siempre que sus objetivos, secuencia didáctica y requisitos técnicos sean compatibles. El diseño de la biblioteca está orientado a mantener visibles los patrones que fundamentan cada módulo, de modo que el estudiante pueda examinar y modificar mecanismos como la máquina de estados, la fábrica de objetos y los mecanismos de detección y respuesta ante colisiones. La licencia MIT y el carácter reutilizable de sus módulos permiten, además, su empleo potencial en prototipos ajenos a un contexto académico.

Este artículo presenta un estudio documental descriptivo sobre la organización modular de Gale y su correspondencia con los proyectos prácticos de Programación de Videojuegos 1 en la Escuela de Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Los Andes. El análisis se centra en los módulos que el código de los proyectos importa y usa efectivamente, y en su relación con los contenidos previstos en el programa analítico de la asignatura. No se evalúan resultados de aprendizaje, desempeño estudiantil, usabilidad ni tiempos de desarrollo.

El objetivo de este artículo es caracterizar la correspondencia entre los contenidos previstos en el programa analítico de la segunda unidad de Programación de Videojuegos 1 y los módulos de la biblioteca Gale que sus ocho proyectos prácticos importan y usan, con evidencia explícita verificada en el código, tomando como base el código fuente de los proyectos entregados por los estudiantes. De manera específica, el artículo busca responder la siguiente pregunta

de investigación: ¿qué módulos de Gale usa cada proyecto práctico, con qué evidencia de uso en el código, y cómo se relaciona esa correspondencia con los contenidos previstos en el programa analítico y con los patrones de diseño documentados en la literatura de arquitectura de motores? Dado su carácter descriptivo, el estudio no evalúa resultados de aprendizaje, desempeño estudiantil ni tiempos de desarrollo; estas dimensiones se identifican como trabajo futuro en la sección de Conclusiones.

El resto del artículo se organiza así: "Antecedentes y fundamentos pedagógicos" revisa bibliotecas y motores educativos similares y sitúa el estudio dentro de un marco de alineación curricular, andamiaje y lectura de código. "Marco técnico de Gale" describe la organización modular de la biblioteca y los patrones de diseño que documenta, situándolos en la literatura de arquitectura de motores. El "Método" describe el procedimiento de análisis documental empleado. Los "Resultados" presentan la correspondencia curricular obtenida. La "Discusión" interpreta esos resultados, los compara con los antecedentes y expone las limitaciones del estudio. Las "Conclusiones" cierran el artículo y presentan los trabajos futuros.

Antecedentes y fundamentos pedagógicos

Usar juegos para enseñar programación cuenta con antecedentes en varias líneas de trabajo. Conviene situar a Gale frente a otros proyectos concebidos explícitamente como herramientas pedagógicas, y no como plataformas de producción como las descritas en la Introducción.

Un primer grupo usa programación visual por bloques. *Scratch* (Resnick et al., 2009) permite construir historias, animaciones y juegos simples arrastrando bloques que representan instrucciones, dirigido principalmente a niños y adolescentes; prioriza la programación por bloques y no se orienta a la lectura de implementaciones en lenguajes de texto ni al estudio explícito de patrones de arquitectura de motores. *Alice* (Cooper et al., 2000) se centra en la enseñanza inicial de secuencia, condicionales y ciclos para estudiantes universitarios de nivel introductorio mediante animación 3D ensamblada visualmente y narración interactiva.

Un segundo grupo usa programación textual orientada a objetos. Greenfoot (Kölling, 2010) es un entorno gráfico interactivo para aprender programación orientada a objetos escribiendo clases Java reales, con el objetivo de transmitir el modelo mental de clases, objetos y mensajes. Greenfoot organiza las actividades alrededor de actores dentro de un micromundo. En la fuente revisada, el énfasis recae en la interacción entre objetos y no en la arquitectura de un videojuego completo. *Pilas* (Ruscitti, 2015) es una biblioteca de Python pensada para que niños y jóvenes construyan videojuegos con rapidez. Ofrece una interfaz de programación de aplicaciones (API) de alto nivel que simplifica varios mecanismos de desarrollo de videojuegos, como el control de pantalla, la física y los personajes. En la documentación revisada, el énfasis recae en la construcción rápida de proyectos.

Un tercer enfoque usa tareas de programación con temática de videojuegos dentro de cursos introductorios ya existentes. Sung et al. (2008) documentan y evalúan asignaciones de este tipo (*game-themed programming assignments*) en cursos introductorios de programación, y reportan que el contexto lúdico mejora la motivación del estudiante incluso sin experiencia previa en gráficos o videojuegos. Estas asignaciones se concentran en ejercicios acotados, no en la arquitectura de una biblioteca completa. En esta misma línea de integrar componentes lúdicos en cursos introductorios, destaca la estrategia LE1 (Pérez y Azuaje, 2019), aplicada previamente en la asignatura Programación 1 de la misma carrera de Ingeniería de Sistemas. Esta propuesta utiliza la biblioteca PR1-ULA, la cual oculta la complejidad técnica y permite a los estudiantes crear animaciones con colores y audios utilizando únicamente nueve instrucciones básicas. Al igual que el trabajo de Sung et al. (2008), esta estrategia se concentra en ejercicios acotados de programación estructurada, sin orientarse a la lectura de arquitecturas complejas.

Un metaanálisis reciente sobre aprendizaje basado en juegos y pensamiento computacional reporta un efecto positivo global de estas intervenciones sobre habilidades de pensamiento computacional en estudios controlados (Lu et al., 2023), lo que respalda el interés pedagógico general del enfoque, sin que ello implique una medición equivalente para Gale. Una revisión reciente sobre la integración de pensamiento computacional, diseño de juegos y *design thinking* documenta también tendencias y aplicaciones educativas de este cruce disciplinar (Wu et al., 2025).

Gale se orienta a estudiantes universitarios con experiencia previa en programación. Emplea Python desde el primer proyecto práctico y organiza el aprendizaje alrededor de componentes de un videojuego completo. Esta orientación la aproxima a Greenfoot y Pilas por el uso de programación textual, pero se diferencia de ambas al hacer explícita la relación entre módulos, patrones de diseño y arquitectura de motores. Esta comparación se retoma en la Discusión.

El sustento pedagógico de Gale, orientado a exponer la arquitectura interna del motor, reposa sobre tres pilares conceptuales: la alineación curricular, la estrategia de andamiaje y la lectura analítica de códigos. La alineación curricular postula que la intencionalidad formativa, las dinámicas de aprendizaje y los mecanismos de evaluación deben guardar una estricta coherencia (Biggs y Tang, 2011). En este caso particular, la correspondencia se articula operacionalmente en tres niveles integrados: las unidades temáticas descritas en el programa oficial, los desarrollos prácticos planteados y los componentes específicos de Gale incorporados en la solución. La distribución general del plan de estudios se detalla en la Tabla 2, en tanto que la articulación entre los trabajos de aplicación, las bibliotecas involucradas y las nociones técnicas abordadas se resume en la Tabla 3.

La estrategia de andamiaje promueve la integración gradual de componentes, permitiendo que las nuevas asignaciones descansen sobre saberes previamente adquiridos; la literatura

científica actual referente al andamiaje en el pensamiento computacional constata su impacto directo en la administración de la carga cognitiva y en el rendimiento durante el desarrollo de código (Shin et al., 2025). En las asignaciones prácticas evaluadas, ciertos módulos de Gale funcionan como una infraestructura compartida, en tanto que otros módulos se agregan en función de los propósitos técnicos particulares de cada trabajo.

Por último, la lectura analítica de códigos enriquece la práctica de la programación, pues facilita el reconocimiento de patrones, la trazabilidad del flujo de control, la ponderación de alternativas arquitectónicas y la intervención sobre bases de código existentes; una revisión sistemática reciente sobre estrategias de depuración confirma la trascendencia pedagógica de desarrollar competencias para interpretar y rastrear código fuente en la educación en computación (Yang et al., 2024). En este marco conceptual, los desarrollos prácticos fundamentados en Gale se estructuran como sistemas funcionales articulados para su escrutinio y extensión. La organización de la biblioteca visibiliza materializaciones concretas de componentes esenciales de un motor, tales como estados, comandos, temporizadores, persistencia y física.

Marco técnico de Gale

Fundamentación en la literatura de arquitectura de motores

Los módulos de Gale que utiliza la asignatura Programación de Videojuegos 1 materializan, con fines didácticos, conceptos documentados en la literatura de arquitectura de motores de videojuegos y en la bibliografía oficial de la asignatura. *Game Engine Architecture* (Gregory, 2019) orienta la organización general de un motor. La obra examina el bucle de juego, la jerarquía de subsistemas (renderizado, física, audio, entrada) y la gestión de recursos. *Game Programming Patterns* (Nystrom, 2014) cataloga patrones específicos de este dominio, entre ellos el bucle de juego, el Observer para eventos del juego, el State para el comportamiento de personajes, el Command para desacoplar el origen de una acción de quien la ejecuta y el Object Pool para partículas y proyectiles, y es la fuente conceptual de módulos que implementan máquinas de estado finitas y sistemas de partículas. Los patrones Factory y Abstract Factory siguen el catálogo de Gamma et al. (1994).

El programa analítico dedica su primera unidad a la historia y las generalidades del diseño de videojuegos, con apoyo en Schell (2008). La inteligencia artificial básica de personajes autónomos que la segunda unidad introduce se resuelve, como se detalla en los Resultados, con los mismos patrones descritos previamente, siguiendo el enfoque de Buckland (2005) para dotar de comportamiento a personajes autónomos mediante máquinas de estado y guiones de decisión sencillos.

El módulo de física bidimensional encapsula *Pymunk* (Blomqvist, 2026). La implementación

se apoya también en principios de diseño de motores de física descritos por Millington (2010) y presenta una fachada que no expone los tipos internos de la biblioteca subyacente. El módulo tilemap interpreta el formato de notación de objetos de JavaScript (JSON) exportado por *Tiled* (Lindeijer, 2024), un editor de mapas de mosaicos de código abierto.

Organización modular de Gale

Gale es un paquete de Python *(gale-engine* en el Índice de Paquetes de Python, PyPI) organizado como una colección de módulos independientes entre sí: *game* (bucle de juego), *input_handler* (entradas), *state* (máquinas de estado), *command* (patrón Command), *camera*, *animation*, *tilemap*, *timer*, *particle_system*, *factory*, *ui* y *physics*, entre otros (Tabla 1). Cada módulo resuelve un problema del dominio de los videojuegos sin exigir que el resto de la biblioteca esté en uso. Un estudiante puede adoptar tilemap para un proyecto práctico sin haber examinado todavía physics, y el instructor puede introducir los módulos en el orden pedagógico que convenga al curso. Conceptualmente, algunos módulos están concebidos como una base de infraestructura común y otros como incorporaciones específicas según el tipo de juego; la Figura 1 esquematiza esta distinción general, mientras que su correspondencia empírica con cada uno de los ocho proyectos prácticos, con evidencia de uso verificada contra el código fuente, se documenta en los Resultados (Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5).

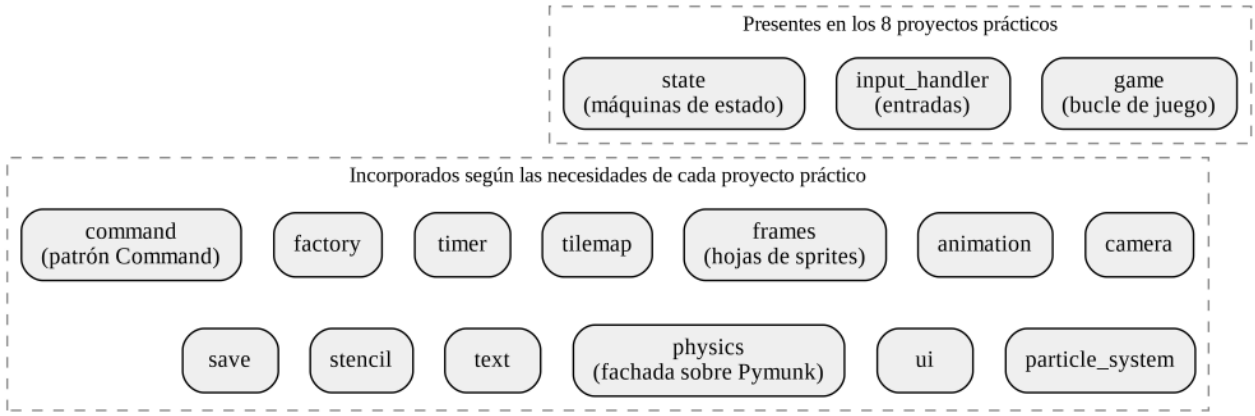


Figura 1: Núcleo común de módulos y módulos incorporados selectivamente en la organización general de Gale.

Fuente: Elaboración propia (2026).

La Figura 1 esquematiza la distinción entre el núcleo de módulos común y los módulos incorporados selectivamente; la Tabla 3, la Tabla 4 y la Tabla 5, en los Resultados, muestran cómo se distribuye esa organización entre los ocho proyectos prácticos analizados y qué evidencia de uso respalda cada módulo. La Tabla 1 complementa esta representación al resumir la función de cada módulo.

Tabla 1: Módulos de Gale con evidencia de uso verificada en el programa curricular y su función principal.

Módulo	Función principal
game	Provee el bucle principal, la inicialización de la ventana y la coordinación general de la ejecución
input_handler	Gestiona eventos de teclado, ratón y mando mediante un mecanismo de notificación a objetos registrados
state	Organiza estados de aplicación, transiciones entre pantallas y estados superpuestos mediante pilas de estados
text	Renderiza texto y facilita su uso en interfaces, marcadores y mensajes del juego
factory	Desacopla la creación de objetos del código que los solicita
frames	Gestiona hojas de sprites y regiones de imagen utilizadas por los objetos gráficos
particle_system	Administra partículas para efectos visuales, proyectiles u objetos de vida breve
timer	Controla temporizadores e interpolaciones de valores en el tiempo
animation	Gestiona animaciones de personajes y otros elementos visuales
camera	Desplaza o transforma el área visible de un mundo de juego
tilemap	Carga y representa mapas de mosaicos exportados desde Tiled
stencil	Aplica máscaras de transparencia y recortes visuales ensuperficies
save	Guarda y recupera el estado de una partida mediante persistencia de datos
ui	Proporciona elementos de interfaz, como paneles, listas, barrasy cuadros de diálogo
command	Encapsula acciones como objetos; permite asociarlas a entradas del jugador o invocarlas desde la lógica de comportamiento depersonajes autónomos
physics	Presenta una fachada sobre Pymunk para simular cuerpos rígidos, colisiones y respuesta física

Fuente: Elaboración propia (2026), a partir del repositorio de Gale y de los módulos importados y usados por los ocho proyectos prácticos analizados.

La biblioteca completa posee más de veinte (20) módulos de nivel superior al momento de esta revisión (agosto de 2026). Este artículo se concentra en el subconjunto de dieciséis (16) que el programa curricular importa y usa, detallado en los Resultados. El resto responde a necesidades ajenas a esta asignatura. El repositorio público de Gale (Mujica, 2026a) incluye una licencia MIT (licencia permisiva que autoriza el uso, copia, modificación y redistribución del código, con la sola condición de conservar el aviso de derechos de autor), pruebas automatizadas y flujos de integración continua, y su desarrollo ha involucrado a estudiantes y docentes del propio departamento como colaboradores. El análisis utilizó la versión disponible en la rama *main* del repositorio, consultada el 23 de agosto de 2026, correspondiente al *commit* *6ef3def*.

Varios módulos son la implementación directa de un patrón de diseño clásico. El módulo *factory* provee las clases *Factory* y *AbstractFactory* (Gamma et al., 1994). El segundo proyecto

práctico instancia Factory para generar los pares de troncos que el pájaro debe atravesar. En el tercer proyecto práctico, Factory y AbstractFactory se instancian para separar la creación de potenciadores y bolas adicionales del código que los solicita. El módulo state implementa el patrón State. Incluye una clase abstracta *BaseState*, una *StateMachine* para gestionar transiciones entre estados de partida y una StateStack para estados superpuestos. El proyecto práctico 7 utiliza esta última para superponer la pantalla de combate por turnos sobre el mapa de exploración sin destruir este último. InputHandler sigue el patrón Observer. Los objetos del juego se registran como escuchas y reciben notificaciones de eventos de teclado, ratón o mando, sin que el manejador de entradas necesite conocer sus tipos concretos.

El módulo *command* implementa el patrón Command (Gamma et al., 1994; Nystrom, 2014). La clase base *Command* encapsula una acción ejecutable sobre un receptor. *CommandBindings* asocia identificadores gestionados por *InputHandler* con comandos ejecutados al presionar o liberar una entrada. En los proyectos prácticos 5 y 6, el jugador instancia *CommandBindings* para responder a las entradas, mientras que las criaturas autónomas invocan comandos compatibles desde su lógica de comportamiento.

Dos módulos adicionales resuelven subsistemas de motor descritos en general por Gregory (2019). El módulo *stencil* controla la transparencia de una superficie mediante una forma definida. En el proyecto práctico 6 se instancia *Stencil* para recortar el personaje al atravesar la abertura de una puerta. El recurso evita que el personaje se vea sobre el muro cuando el escenario se renderiza antes que las entidades. El módulo *save* implementa el subsistema de persistencia mediante *SaveManager*, que guarda y carga el estado del mundo en una ranura; el proyecto práctico 7 lo instancia para que el estudiante continúe una partida de rol entre sesiones.

El último proyecto práctico de la segunda unidad introduce la simulación de cuerpos rígidos a través de physics. En la versión de Gale revisada para este artículo, *physics* encapsula Pymunk (Blomqvist, 2026) sin exponerla directamente; el proyecto práctico 8 instancia World, BoxShape y CircleShape para construir la simulación de proyectiles. En la fachada de Gale, *World* administra el espacio de simulación de Pymunk y lo avanza en unidades de píxeles; *Body* representa un cuerpo físico con su tipo (estático, cinemático o dinámico) y *Shape* (*BoxShape, CircleShape*) define su geometría de colisión. Gale convierte internamente las coordenadas del proyecto mediante el factor de escala *pixels_per_meter* definido en World, antes de incorporarlas a la simulación de Pymunk.

Método de trabajo

En este artículo, “caso de estudio” designa la experiencia global de aplicar Gale en la asignatura Programación de Videojuegos 1, mientras que “proyecto práctico” designa cada uno de los ocho programas Python completos, ejecutables y extensibles de la segunda unidad, diseñados para abordar uno o más contenidos técnicos de esa unidad. En lo que sigue se

usa "proyecto práctico" para referirse a cada uno de los ocho programas, "unidad" para la organización curricular y "contenido técnico" o "concepto técnico" para el mecanismo introducido por cada uno.

El diseño de este estudio es un análisis documental descriptivo que compara el programa analítico oficial de la asignatura con el código fuente de los proyectos entregados a los estudiantes. Las fuentes documentales fueron el programa analítico de la asignatura, el repositorio público de los proyectos prácticos (*VideoGameProgrammingI*) y el repositorio público de la biblioteca Gale, este último consultado para verificar los mecanismos internos de los módulos identificados. El corpus está constituido por los ocho proyectos prácticos de la segunda unidad. La unidad de análisis fue cada proyecto práctico completo publicado para los ocho contenidos de esa unidad. La fuente de los proyectos prácticos es el repositorio público VideoGameProgrammingI (Mujica, 2026b), publicado directamente en la raíz del repositorio en carpetas numeradas de 01 a 08, consultado el 23 de agosto de 2026 en la rama main, correspondiente al *commit f5d5517*.

El procedimiento de extracción tuvo dos pasos. Primero, se usó como criterio inicial de localización la presencia de una sentencia import que referenciara un submódulo de gale dentro del paquete src/ de cada proyecto; esta extracción se realizó mediante inspección manual directa del código fuente publicado en el repositorio, revisando cada archivo del paquete src/ de los ocho proyectos prácticos, sin emplear un analizador sintáctico (AST) ni otra herramienta automatizada. Segundo, para cada módulo localizado se verificó evidencia explícita de uso en el mismo código: instanciación o herencia de una clase del módulo, invocación de una función o método, registro de una asociación de entrada (por ejemplo, mediante *CommandBindings*), o uso de una constante, tipo u objeto propio del módulo. Este segundo paso se aplicó a los dieciséis módulos identificados en cada uno de los ocho proyectos prácticos, sin excepción; la Tabla 5 documenta, para cada módulo, un ejemplo representativo de esa evidencia (archivo, mecanismo y proyecto), y en el proceso se constató que la evidencia de uso está presente en todas las combinaciones de módulo y proyecto reportadas en la Tabla 4, no solo en las ilustradas en la Tabla 5.

La importación explícita, sin evidencia adicional de uso, no habría permitido concluir que un módulo se ejecuta durante una partida. Al verificar evidencia explícita de uso para cada módulo identificado, los resultados de este estudio describen tanto la dependencia declarada como el uso efectivo documentado en el código, y no solo la distribución de importaciones. Esto no equivale, sin embargo, a trazar la ejecución del programa en tiempo real: la verificación es un análisis estático del código fuente, no una instrumentación en tiempo de ejecución, por lo que no establece con qué frecuencia se alcanza cada mecanismo durante una partida real. No se contabilizaron importaciones indirectas realizadas por dependencias de terceros ni módulos incluidos en el repositorio de Gale que no fueran importados por los proyectos. Los resultados de este procedimiento se consolidaron en una matriz de presencia/ausencia por

proyecto práctico y en una matriz de evidencia de uso representativa por módulo, resumidas en la Tabla 4 y la Tabla 5, respectivamente; junto con la Tabla 3, las tres constituyen la matriz de extracción de este estudio. Este procedimiento permitió distinguir entre los módulos previstos en el programa analítico y los que los proyectos importan y usan efectivamente. El proyecto práctico 8 fue verificado adicionalmente contra la versión de Gale identificada por el *commit 6ef3def*, en la cual physics depende de Pymunk.

La columna "Concepto técnico" de la Tabla 3 fue asignada por los autores mediante lectura directa del código de cada proyecto práctico y su cotejo con los contenidos previstos en el programa analítico de la segunda unidad; es, por tanto, una codificación interpretativa realizada por el mismo equipo que desarrolla Gale, sin un segundo codificador independiente que validara la asignación. La verificación de evidencia de uso (Tabla 4 y Tabla 5) fue realizada por el mismo equipo, mediante el mismo procedimiento de inspección manual, sin un segundo revisor independiente. Estas limitaciones se retoman en la siguiente sección.

Este estudio no evalúa resultados de aprendizaje, desempeño académico, usabilidad ni tiempos de desarrollo de los estudiantes. Su alcance se limita a caracterizar la correspondencia entre el programa de la asignatura, los proyectos prácticos disponibles y los módulos de Gale que cada uno importa y usa. Como limitaciones metodológicas adicionales: el corpus proviene de una sola asignatura y una sola institución; el estudio no incluye observación de aula ni de la experiencia real de los estudiantes; y el análisis corresponde a versiones específicas de los dos repositorios consultadas en una fecha determinada, por lo que una actualización posterior de cualquiera de ellos podría modificar los resultados aquí reportados.

Resultados

Estructura curricular de Programación de Videojuegos 1

La asignatura Programación de videojuegos 1 (código ISPPV1), correspondiente al octavo semestre, es una materia electiva adscrita al Departamento de Computación de la Escuela de Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Los Andes, con prelación en Programación 3, cuyo programa analítico organiza el contenido en tres unidades (Programación de Videojuegos 1, 2026). La Tabla 2 resume el objetivo de cada unidad y si Gale se emplea en ella.

Correspondencia entre proyectos prácticos y módulos de Gale

Gale se concentra por completo en la segunda unidad. La Tabla 3 resume, para cada uno de sus ocho proyectos prácticos, el estilo de juego y los módulos de Gale con evidencia de uso verificada en el código, según el procedimiento descrito en el Método.

Tabla 2: Estructura general del programa de Programación de Videojuegos 1.

Unidad	Contenido	¿Se usa Gale?
Primera: Introducción	Historia y generalidades del diseño de videojuegos, matemática y física para videojuegos, arquitecturas y patrones de diseño. Contenido teórico, sin proyecto práctico propio.	No
Segunda: Videojuegos en 2D	Ocho proyectos prácticos que introducen mecanismos técnicos adicionales de manera progresiva sobre una base común, cada uno completo y jugable (carpetas 01 a 08 del repositorio público). Es el núcleo práctico de la asignatura.	Sí, en sus ocho proyectos prácticos (ver Tablas 3, 4 y 5)
Tercera: Videojuegos en 3D	Exploración guiada de ejemplos ya construidos en los motores comerciales más usados de la industria (Unity, O3DE, Unreal Engine), seguida de un taller donde el estudiante arma su primer proyecto en uno de ellos.	No: el objetivo es que el estudiante conozca de primera mano las herramientas de producción de la industria, no extenderlas

Fuente: Elaboración propia (2026), a partir del programa analítico de la asignatura (Programación de Videojuegos 1, 2026).

Tabla 3: Proyectos prácticos de la segunda unidad, módulos de Gale con evidencia de uso verificada y conceptos técnicos asociados.

Proyecto	Estilo de juego	Módulos de Gale con evidencia de uso	Concepto técnico
1	Dos jugadores con paletas y pelota, en la línea de los primeros juegos de arcade	*game, input_handler, state, text*	Bucle de juego, entradas y máquina de estados como base común
2	Desplazamiento lateral infinito con saltos cronometrados	*factory, game, input_handler, state, text*	Creación desacoplada de pares de troncos mediante Factory
3	Destrucción de bloques con una paleta y una pelota que rebota	*factory, frames, game, input_handler, particle_system, state, text*	Creación desacoplada de potenciadores y bolas adicionales; efectos con particle_system
4	Intercambio y combinación de fichas en una cuadrícula (match-3)	*frames, game, input_handler, state, text, timer*	Temporización de la mecánica de intercambio
5	Plataformas con enemigos y potenciadores	*animation, camera, command, game, input_handler, state, text, tilemap, timer*	Mapas de mosaicos, cámara, animación de personajes y patrón Command para las entradas del jugador
6	Acción-aventura en vista cenital con mazmorras, en el estilo de la saga The Legend of Zelda	*animation, command, game, input_handler, state, stencil, text, timer*	Animación, temporización, enmascaramiento visual mediante stencil y reutilización del patrón Command en criaturas autónomas
7	Rol (RPG) con combate por turnos, siguiendo las convenciones clásicas del subgénero de rol japonés	*animation, game, input_handler, save, state (StateStack), timer, ui*	Persistencia, interfaz y superposición de estados mediante StateStack
8	Física de proyectiles con mecánica de tirachinas	*camera, game, input_handler, physics, state, text, timer*	Simulación de cuerpos rígidos mediante una fachada sobre Pymunk

Fuente: Elaboración propia (2026), verificado contra el código fuente publicado en VideoGameProgrammingI (Mujica, 2026b).

Los módulos *game* e *input_handler* están presentes en los ocho proyectos prácticos revisados, junto con state. La presencia de estos tres módulos, con evidencia de uso verificada

en los ocho repositorios, indica que constituyen la base técnica común de los proyectos prácticos analizados (el núcleo de la Figura 1). La Tabla 3 muestra que el segundo proyecto práctico usa *factory*, el tercero *particle_system* y el cuarto *timer*. El quinto añade *tilemap* y *animation*. El quinto y el sexto además comparten el módulo command: el jugador instancia *CommandBindings* para vincularlo, y las criaturas autónomas de ambos proyectos invocan comandos compatibles desde su lógica de comportamiento. El octavo usa *physics*, descrito en el Marco técnico de Gale.

La Tabla 4 presenta la misma información como una matriz binaria de presencia/ausencia, cruzando los ocho proyectos prácticos con los dieciséis módulos identificados, para facilitar la lectura exhaustiva de la correspondencia módulo por módulo. Cada celda marcada fue verificada con evidencia de uso explícita, no solo con la importación.

Tabla 4: Matriz de presencia (X) o ausencia, con evidencia de uso verificada, de los dieciséis módulos de Gale en cada uno de los ocho proyectos prácticos.

Módulo	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
game	X	X	X	X	X	X	X	X
input_handler	X	X	X	X	X	X	X	X
state	X	X	X	X	X	X	X	X
text	X	X	X	X	X	X		X
factory		X	X					
frames			X	X				
particle_system			X					
timer				X	X	X	X	X
animation					X	X	X	
camera					X			X
tilemap					X			
command					X	X		
stencil						X		
save							X	
ui							X	
physics								X

Fuente: Elaboración propia (2026), verificado contra el código fuente publicado en VideoGameProgrammingI (Mujica, 2026b).

La Tabla 5 documenta, para cada uno de los dieciséis módulos, un ejemplo representativo de la evidencia de uso verificada (instanciación, herencia o invocación), con el archivo y el proyecto en el que se comprobó. Esta evidencia se verificó, de la misma manera, en cada una de las demás combinaciones de módulo y proyecto marcadas en la Tabla 4.

Tabla 5: Ejemplo representativo de evidencia de uso verificada para cada módulo de Gale.

Módulo	Evidencia de uso	Archivo (proyecto)
game	Herencia: class Pong (Game)	src/Pong.py (proyecto 1)
input_handler	Invocación: InputHandler.set_keyboard_action (...)	settings.py (proyecto 1)
state	Instanciación: StateMachine (...)	src/Pong.py (proyecto 1)
text	Invocación: render_text (...)	src/rendering.py (proyecto 1)
factory	Instanciación: Factory (LogPair)	src/World.py (proyecto 2)
frames	Invocación: generate_frames (spritesheet, 32, 16)	src/utilities/frames.py (proyecto 3)
particle_system	Instanciación: ParticleSystem (...)	src/Brick.py (proyecto 3)
timer	Invocación: Timer.every (1, decrement_timer)	src/states/PlayState.py (proyecto 4)
animation	Instanciación: Animation ([...])	src/states/game_states/StartState.py (proyecto 5)
camera	Instanciación: Camera (settings.VIRTUAL_WIDTH, ...)	src/states/game_states/PlayState.py (proyecto 5)
tilemap	Invocación: load_tiled_map (...)	src/GameLevel.py (proyecto 5)
command	Instanciación: CommandBindings ()	src/Player.py (proyecto 5)
stencil	Instanciación: Stencil ((frame.width, frame.height))	src/Entity.py (proyecto 6)
save	Invocación: SaveManager ().load (...)	src/states/game/StartState.py (proyecto 7)
ui	Instanciación: ListView (...)	src/gui/Menu.py (proyecto 7)
physics	Instanciación: World (gravity=settings.GRAVITY)	src/states/game/PlayState.py (proyecto 8)

Fuente: Elaboración propia (2026), verificado contra el código fuente publicado en VideoGameProgrammingI (Mujica, 2026b).

Cada proyecto práctico se entrega como un programa Python autónomo que el estudiante ejecuta, lee y extiende con evaluaciones continuas, en lugar de partir de cero en cada corte del semestre, como prescribe la estrategia metodológica del curso (Programación de Videojuegos 1, 2026). El contraste entre el programa analítico y el código fuente de los ocho proyectos prácticos muestra que dieciséis (16) módulos de Gale (*game, input_handler, state, text, factory, frames, particle_system, timer, animation, camera, tilemap, command, stencil, save, ui* y *physics*) tienen evidencia de uso verificada en al menos uno de ellos; varios se relacionan con patrones de diseño o con referencias técnicas discutidas en el Marco técnico de Gale.

Discusión

La correspondencia documentada en los Resultados permite discutir la relación entre la secuencia de proyectos prácticos y la organización modular de Gale. Los tres módulos compartidos, *game, input_handler* y *state*, proporcionan una base técnica común para los ocho proyectos prácticos revisados. Sobre ella, la secuencia incorpora módulos adicionales de forma gradual: este patrón es consistente con un criterio de diseño didáctico de tipo andamiaje (Shin et al., 2025), aunque la selección de módulos en cada proyecto responde también al tipo de juego y al objetivo técnico específico. Este estudio no mide el efecto de esa organización sobre el aprendizaje.

La Tabla 3 y la Tabla 4 muestran que los proyectos prácticos incorporan combinaciones diferentes de módulos, con evidencia de uso verificada en cada caso. Por ejemplo, los proyectos que usan *tilemap* no usan *physics*, mientras que ui se incorpora en el proyecto práctico 7 sin mapas de mosaicos. Esta distribución es consistente con el diseño modular de Gale y con la alineación curricular documentada en la Tabla 2 y la Tabla 3.

Frente a un motor comercial, esta organización modular ofrece ganancias y costos educativos que conviene hacer explícitos. Se gana visibilidad, dado que cada módulo puede leerse como código de producción propio, sin la mediación de un editor visual o de componentes preconstruidos, lo que es consistente con la perspectiva de lectura de código de los Antecedentes. Se pierde, en cambio, la infraestructura de producción que un motor comercial resuelve de fábrica (canalización gráfica avanzada, herramientas visuales de edición de escenas, soporte multiplataforma consolidado), y buena parte del código de infraestructura debe escribirse o adaptarse en cada proyecto en lugar de configurarse. Esta diferencia sitúa a Gale como una herramienta orientada a hacer explícitos los mecanismos internos, a costa de la rapidez de producción que ofrecen Unity, Unreal Engine o Godot (Epic Games, 2026; Godot Engine, 2026; Unity Technologies, 2026).

Al tratarse de una biblioteca de código abierto cuyo repositorio incluye pruebas automatizadas y flujos de integración continua, los estudiantes pueden inspeccionar la implementación de los mecanismos que usan en sus proyectos y, en algunos casos, han contribuido a ella. Esta posibilidad de lectura y modificación del código es consistente con la perspectiva de lectura de código descrita en Antecedentes y fundamentos pedagógicos. El uso de Gale en proyectos fuera de los ejercicios obligatorios se aprecia en dos repositorios adicionales. Un estudiante del curso construyó, como proyecto final, *The Rescue of Celeste*, un juego de aventura y rescate sobre Gale y Pygame (Salas, 2024). El repositorio de Binary Strike (Ochoa y Márquez, 2023) documenta el uso de Gale en un proyecto surgido del curso que posteriormente continuó como desarrollo independiente. Ninguno de los dos constituye, por sí mismo, evidencia de que ese uso mejore el aprendizaje o la retención de los patrones involucrados, algo que este estudio no midió.

Los antecedentes revisados permiten situar a Gale como una biblioteca dirigida a estudiantes universitarios con experiencia previa en programación. Scratch (Resnick et al., 2009) y Alice (Cooper et al., 2000) privilegian la programación visual para introducir conceptos iniciales. Por su diseño, no se centran en la lectura de implementaciones textuales de patrones de arquitectura de motores.

Gale parte de un contexto distinto: estudiantes universitarios que ya programan en un lenguaje textual y pueden leer clases como *StateMachine* o *AbstractFactory* como código de producción. Esta diferencia frente a herramientas introductorias como la estrategia LE1 (Pérez y Azuaje, 2019) es, ante todo, una diferencia de nivel de abstracción, público objetivo y grado de exposición de la arquitectura interna, y no una trayectoria de aprendizaje demostrada por este estudio, que no compara cohortes ni sigue trayectorias de estudiantes entre herramientas. Mientras que la biblioteca PR1-ULA, utilizada en LE1, encapsula y oculta la complejidad para permitir la construcción amigable de animaciones en los primeros semestres, el diseño de Gale prioriza intencionalmente que los patrones de diseño orientados a objetos permanezcan visibles y modificables para estudiantes con mayor experiencia previa.

Greenfoot (Kölling, 2010) expone código Java real, pero se centra principalmente en la interacción entre actores dentro de un micromundo; en la fuente revisada, el énfasis no recae en la arquitectura de un videojuego completo. Gale organiza sus módulos alrededor de componentes habituales de un videojuego, como el bucle de juego, los estados, los comandos, las cámaras, la interfaz y la física.

Pilas (Ruscitti, 2015) comparte con Gale el lenguaje y el público universitario potencial. Ofrece una interfaz de alto nivel que simplifica el control de pantalla, la física y otros mecanismos de desarrollo; su documentación se orienta principalmente a la construcción rápida de proyectos. En Gale, el diseño prioriza que los patrones permanezcan visibles para el estudiante, aun cuando ello no persiga la máxima rapidez de producción.

Dentro del conjunto de antecedentes revisados, ninguno combina simultáneamente lenguaje de texto completo, arquitectura de aplicación expuesta como código y fundamentación explícita en la literatura de patrones de diseño y arquitectura de motores; esta comparación se limita a los antecedentes aquí revisados y no constituye una revisión sistemática del campo. Gale se apoya en Pygame para el renderizado, lo que deja fuera de la asignatura la tubería gráfica programable (sombreadores y renderizado acelerado por unidad de procesamiento gráfico, GPU) y la representación de escenas en tres dimensiones. Esos contenidos son el objeto de otra asignatura electiva del mismo Departamento, Computación Gráfica, con la que Programación de Videojuegos 1 se complementa.

La publicación de Gale bajo licencia MIT y la disponibilidad pública de su código

fuente permiten que docentes y estudiantes inspeccionen, adapten y redistribuyan los módulos empleados en los proyectos. Esta apertura permite la inspección, adaptación y redistribución de los recursos técnicos empleados en la enseñanza de programación de videojuegos, sin que este estudio mida su efecto sobre la construcción colaborativa de esos recursos. La revisión de código permite verificar la presencia y el uso efectivo de un módulo en el código fuente, pero no permite inferir por sí misma que los estudiantes comprendan los patrones asociados ni medir el efecto de Gale sobre su aprendizaje. Las afirmaciones de este artículo se limitan, en consecuencia, a la correspondencia observable entre el programa, los proyectos prácticos y los módulos que estos importan y usan.

Limitaciones del estudio

El estudio analiza documentación curricular y código fuente de proyectos; por lo tanto, no evalúa desempeño académico, aprendizaje, motivación, carga cognitiva, usabilidad ni percepción de estudiantes. La interpretación de la secuencia como una forma de andamiaje se limita al diseño de los proyectos y no permite atribuir efectos sobre el aprendizaje. El corpus proviene de una sola asignatura y una sola institución, lo que limita la transferencia directa de los hallazgos a otros programas curriculares. El estudio tampoco incluye observación directa del aula ni de la experiencia de los estudiantes al usar los proyectos. La evidencia de uso verificada es, además, un análisis estático del código fuente: confirma que un mecanismo se instancia, se hereda o se invoca en el programa, pero no mide con qué frecuencia se alcanza esa ruta de código durante una partida real ni la profundidad de comprensión del estudiante sobre ese mecanismo.

Conclusiones

Este estudio caracterizó la correspondencia entre los contenidos previstos en el programa analítico de la segunda unidad de Programación de Videojuegos 1 y los módulos de Gale que sus ocho proyectos prácticos importan y usan, con evidencia de uso verificada directamente en el código fuente. El análisis mostró que los ocho proyectos prácticos comparten los módulos de bucle de juego, manejo de entradas y estados, e incorporan otros módulos según el tipo de juego y el objetivo técnico de cada uno, en una organización consistente con los contenidos previstos por el programa analítico. La contribución del artículo es documental, dado que ofrece una correspondencia curricular verificada, con evidencia de uso contra el código fuente público de ambos repositorios, reproducible por terceros a partir de las ramas y *commits* referenciados en el Método, y transferible como método de análisis a otras bibliotecas o asignaturas de programación de videojuegos. Estos hallazgos describen la organización técnica de los proyectos prácticos y la relación de sus módulos con el programa analítico, pero no permiten inferir por sí mismos efectos sobre el aprendizaje, la motivación o el desempeño de los estudiantes, que quedan fuera del alcance demostrado por este estudio.

La evaluación con cohortes de estudiantes queda fuera del alcance de este estudio. Trabajos

futuros podrían examinar los tiempos de desarrollo por proyecto práctico, las dificultades recurrentes y el aprendizaje de patrones y arquitectura mediante una comparación sistemática con otras herramientas educativas, y podrían complementarse con instrumentos que evalúen específicamente los efectos del andamiaje descrito, con una validación de la codificación de conceptos técnicos y de la evidencia de uso por un segundo codificador independiente, y con instrumentación en tiempo de ejecución que mida la frecuencia real con que cada mecanismo se alcanza durante una partida. Aunque el análisis se limita al programa curricular de Programación de Videojuegos 1, Gale incluye módulos que no se examinan aquí, entre ellos componentes para inteligencia artificial y comunicación en red, que podrán documentarse en futuras experiencias docentes. El repositorio de Binary Strike muestra un uso de la biblioteca fuera de los ejercicios obligatorios, pero no sustituye una evaluación sistemática de su adopción en otros contextos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Departamento de Computación de la Escuela de Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Los Andes, así como a las y los estudiantes de Programación de Videojuegos 1 que, semestre a semestre, han contribuido a Gale con reportes de fallas, sugerencias y código.

Referencias

Biggs, J., y Tang, C. (2011). *Teaching for quality learning at university (4.ª ed.)* Open University Press / McGraw-Hill Education.

Blomqvist, V. (2026). *Pymunk (versión 7.3.0)*. [Biblioteca de software]. https://www.pymunk.org

Buckland, M. (2005). *Programming game AI by example*. Wordware Publishing.

Cooper, S., Dann, W., y Pausch, R. (2000). Alice: A 3-D tool for introductory programming concepts. *Journal of Computing Sciences in Colleges*, *15*(5), 107-116. https://dl.acm.org/doi/10.5555/364133.364161

Epic Games. (2026). *Unreal Engine*. Epic Developer Community. https://dev.epicgames.com/documentation/unreal-engine

Gamma, E., Helm, R., Johnson, R., y Vlissides, J. (1994). *Design patterns: Elements of reusable object-oriented software*. Addison-Wesley.

Godot Engine. (2026). *Godot Docs*. https://docs.godotengine.org

Gregory, J. (2019). *Game engine architecture*. CRC Press.

Kölling, M. (2010). The Greenfoot programming environment. *ACM Transactions on Computing Education*, *10*(4), Artículo 14, 1-21. https://doi.org/10.1145/1868358.1868361

Lindeijer, T. (2024). *Tiled map editor*. Tiled. https://www.mapeditor.org

Lu, Z., Chiu, M., Cui, Y., Mao, W., y Lei, H. (2023). Effects of game-based learning on students' computational thinking: A meta-analysis. *Journal of Educational Computing Research*, *61*(1), 235-256. https://doi.org/10.1177/07356331221100740

Millington, I. (2010). *Game physics engine development*. CRC Press.

Mujica, A. (2026a). *Gale [Repositorio de código fuente]*. GitHub. https://github.com/R3mmurd/Gale

Mujica, A. (2026b). *VideoGameProgrammingI [Repositorio de código fuente]*. GitHub. https://github.com/R3mmurd/VideoGameProgrammingI

Nystrom, R. (2014). *Game programming patterns*. Genever Benning.

Ochoa, L., y Márquez, K. (2023). *Binary Strike [Repositorio de código fuente]*. GitHub. https://github.com/lewis8a/binarystrike

Pérez, J., y Azuaje, M. (2019). LE1: Una estrategia amistosa para un curso introductorio de programación. *Educación en Ingeniería*, *14*(28), 45-53. https://www.researchgate.net/publication/338547376_LE1_Una_estrategia_amistosa_para_un_curso_introductorio_de_programacion

Programación de Videojuegos 1. (2026). *Programa analítico: Programación de videojuegos 1 (código ISPPV1) [Documento curricular]*. Departamento de Computación, Universidad de Los Andes.

Resnick, M., Maloney, J., Monroy, A., Rusk, N., Eastmond, E., Brennan, K., Millner, A., Rosenbaum, E., Silver, J., Silverman, B., y Kafai, Y. (2009). Scratch: Programming for all. *Communications of the ACM*, *52*(11), 60-67. https://doi.org/10.1145/1592761.1592779

Ruscitti, H. (2015). *Pilas Engine (documentación, versión 0.83)*. Pilas Engine. https://pilas.readthedocs.io

Salas, J. (2024). *The Rescue of Celeste [Repositorio de código fuente]*. GitHub. https://github.com/JesusSalasG7/Video_game_project

Schell, J. (2008). *The art of game design: A book of lenses*. Morgan Kaufmann.

Shin, Y., Jung, J., Choi, S., y Jung, B. (2025). The influence of scaffolding for computational thinking on cognitive load and problem-solving skills in collaborative programming. *Education and Information Technologies*, *30*, 583-606. https://doi.org/10.1007/s10639-024-13104-0

Sung, K., Panitz, M., Reed, R., y Anderson, R. (2008). CS1/2 game-themed programming assignments for faculty. *Journal of Game Development*, *3*, 27-47.

Unity Technologies. (2026). *Unity Documentation*. Unity. https://docs.unity3d.com

Wu, C., Chien, Y., Chou, M., y Huang, Y. (2025). Integrating computational thinking, game design, and design thinking: A scoping review on trends, applications, and implications for education. *Humanities and Social Sciences Communications*, *12*, Artículo 163. https://doi.org/10.1057/s41599-025-04502-x

Yang, S., Baird, M., O'Rourke, E., Brennan, K., y Schneider, B. (2024). Decoding debugging instruction: A systematic literature review of debugging interventions. *ACM*

Transactions on Computing Education, *24*(4), Artículo 45, 1-44. https://doi.org/10.1145/3690652

Asistente robótico de medicación con dispensación automatizada e interfaz multisensorial

Assistente robótico de medicação com dispensação automatizada e interface multissensorial

Robotic medication assistant with automated dispensing and a multisensory interface

Laura Carrillo [1]
Juan González [2]
Nicole Parra [3]
Andrés Rodríguez [4]
Hernán Ramírez [5]
Unidad Educativa Colegio Sagrada Familia, Mérida, Venezuela[1,2,3,4]
Centro de Investigaciones de Astronomía y Tecnologías Aplicadas Francisco J. Duarte, Mérida, Venezuela[5]
launazacarri2021@gmail.com[1]
gonzalezmolinajp2009@gmail.com[2]
nicole.parra260@gmail.com[3]
andalerodriguez@gmail.com[4]
hr@hernanramirez.info[5]

Fecha de recepción: 03/08/2026
Fecha de aceptación: 30/10/2026
Pág: 76 – 91
DOI: 10.5281/zenodo.23887527

Resumen

La falta de adherencia terapéutica es un problema de salud pública mundial con consecuencias clínicas y económicas relevantes. El objetivo fue desarrollar un asistente robótico de medicación con un mecanismo de dispensación automatizado y una interfaz multisensorial. Además, se validó su desempeño técnico en laboratorio. Se aplicó un enfoque de investigación tecnológica con el marco de trabajo Scrum en cuatro ciclos de dos semanas. El sistema se estructuró en tres niveles: un servidor web en Django, un intermediario de mensajería por publicación y suscripción, y un nodo embebido. Este nodo conserva el cronograma de dosis en memoria no volátil y decide de forma autónoma.

Esta obra está bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0.

El prototipo consta de un disco rotatorio de quince (15) compartimientos, accionado por un motor paso a paso con avance de 24° por compartimiento. Incluye alertas visuales y sonoras, y confirmación de la toma mediante un pulsador. Se aplicó un protocolo de esfuerzo de cien (100) ciclos consecutivos de dispensación. La precisión de posicionamiento angular alcanzó 98,0 % de ciclos exitosos. La continuidad del enlace y la integridad del registro alcanzaron 100 %. La latencia media entre la orden del servidor y el inicio del giro fue de 0,82 s. El consumo osciló entre 120 mA y 280 mA según el modo de operación. Se concluye que es viable integrar equipos de diseño abierto y programas de código libre para automatizar la dispensación domiciliaria. La eficacia clínica sobre la adherencia no fue evaluada y requiere estudios posteriores con pacientes.

Palabras clave: adherencia terapéutica, dispensación automatizada, internet de las cosas, sistemas embebidos, teleasistencia.

Resumo

A falta de adesão terapêutica é um problema de saúde pública mundial com consequências clínicas e econômicas relevantes. O objetivo foi desenvolver um assistente robótico de medicação com um mecanismo de dispensação automatizado e uma interface multissensorial. Além disso, seu desempenho técnico foi validado em laboratório. Adotou-se uma abordagem de pesquisa tecnológica utilizando a metodologia Scrum, estruturada em quatro ciclos de duas semanas. O sistema foi organizado em três níveis: um servidor web em Django, um intermediário de mensagens baseado no modelo de publicação e assinatura, e um nó embarcado. Este nó armazena o cronograma de doses em memória não volátil e toma decisões de forma autônoma. O protótipo consiste em um disco rotativo com quinze (15) compartimentos, acionado por um motor de passo com avanço de 24° por compartimento. Inclui alertas visuais e sonoros, além de um botão para confirmação da tomada do medicamento. Foi aplicado um protocolo de estresse composto por cem (100) ciclos consecutivos de dispensação. A precisão do posicionamento angular atingiu 98,0% de ciclos bem-sucedidos. A continuidade da conexão e a integridade do registro alcançaram 100%. A latência média entre o comando do servidor e o início do giro foi de 0,82 s. O consumo variou entre 120 mA e 280 mA, dependendo do modo de operação. Conclui-se que é viável integrar equipamentos de design aberto e softwares de código livre para automatizar a dispensação domiciliar. A eficácia clínica na adesão terapêutica não foi avaliada, sendo necessários estudos posteriores com pacientes.

Palavras-chave: adesão terapêutica, dispensação automatizada, internet das coisas, sistemas embarcados, teleassistência.

Abstract

Poor adherence to treatment is a global public health problem with relevant clinical and economic consequences. The objective was to develop a robotic medication assistant with an automated dispensing mechanism and a multisensory interface. Its technical performance was also validated under laboratory conditions. A technological research approach was applied, using the Scrum framework in four two-week cycles. The system was structured in three levels: a web server in Django, a publish and subscribe messaging broker, and an embedded node. This node stores the dosing schedule in non-volatile memory and operates autonomously. The prototype consists of a rotating disc of fifteen (15) compartments, driven by a stepper motor with an advance of 24° per compartment. It includes visual and audible alerts, and confirmation of intake by means of a push button. A stress protocol of one hundred (100) consecutive dispensing cycles was applied. Angular positioning accuracy reached 98.0% of successful cycles. Link continuity and record integrity reached 100%. The mean latency between the server command and the start of rotation was 0.82 s. Current consumption ranged from 120 mA to 280 mA depending on the operating mode. It is concluded that integrating open hardware and free software to automate home dispensing is feasible. Clinical efficacy on adherence was not evaluated and requires further studies with patients.

Keywords: automated dispensing, embedded systems, internet of things, telecare, therapeutic adherence.

Introducción

La adherencia terapéutica se define como el grado en que el comportamiento de una persona se corresponde con las recomendaciones acordadas con un profesional de la salud, según la Organización Mundial de la Salud (2003). Este comportamiento incluye tomar medicamentos, seguir un régimen alimentario o modificar hábitos de vida. A diferencia del concepto de cumplimiento, la adherencia supone la participación activa y consentida del paciente. La literatura distingue dos formas de incumplimiento. El intencionado ocurre cuando la persona decide conscientemente no seguir la pauta. El involuntario ocurre cuando existe la intención de cumplirla, pero intervienen barreras como el olvido, la confusión de horarios o el deterioro cognitivo. La Organización Mundial de la Salud (2003) estima que, en los países desarrollados,

cerca del 50 % de los pacientes con enfermedades crónicas no cumplen adecuadamente sus tratamientos. Además, señala que mejorar este indicador tendría un impacto sanitario mayor que muchos avances terapéuticos específicos.

Este panorama se agrava con la polifarmacia, entendida como la administración simultánea de varios medicamentos. Arriagada et al. (2020) señalan que la polifarmacia se asocia con más errores en la autoadministración de medicamentos en personas mayores. Además, en este grupo, uno de cada diez ingresos hospitalarios se debe a un efecto adverso a medicamentos. En consecuencia, las intervenciones dirigidas a reducir el olvido involuntario poseen un valor sanitario directo.

Como respuesta tecnológica, la teleasistencia domiciliaria y el internet de las cosas aplicado a la salud permiten que dispositivos físicos recolectan, procesan y transmiten datos en tiempo real hacia el personal cuidador. Benedetti et al. (2022) señalan que la eficacia de un sistema de teleasistencia no radica en la emisión de una alarma local. Su valor está en la capacidad de notificar a un tercero el incumplimiento. Asimismo, la confiabilidad de la transmisión de datos condiciona directamente la seguridad del paciente.

En el ámbito académico regional se identificaron dos antecedentes directos. Moscoso y Villacrés (2020) diseñaron un prototipo de máquina dispensadora de medicamentos en forma de pastillas para adultos mayores. Para ello emplearon una estructura mecánica controlada por actuadores electromecánicos, y demostraron la viabilidad de la dosificación automatizada para reducir el error humano. Por su parte, Arango et al. (2022) desarrollaron un pastillero inteligente basado en el internet de las cosas para personas mayores con dolencias como la Enfermedad de Alzheimer. Con este sistema, el cuidador recibe alertas remotas sobre la ingesta. Ambos trabajos validan por separado la dispensación mecánica y la telemetría. Sin embargo, no integran la verificación del retiro de la dosis ni garantizan la operación del dispositivo ante la caída del enlace de red.

En el plano comercial existen alternativas como los pastilleros con alarma, los dispensadores con seguimiento remoto y los sistemas de teleasistencia con central de operadores. Su análisis comparativo evidenció tres limitaciones recurrentes. Primero, dependen de que el usuario elija el compartimiento correcto. Segundo, registran la apertura de una tapa, pero no el retiro efectivo de la dosis. Tercero, suelen requerir suscripciones mensuales que restringen su acceso en contextos económicos emergentes.

Desde el punto de vista de los componentes, el microcontrolador ESP32 es un sistema en chip con conectividad inalámbrica Wi-Fi y Bluetooth y dos núcleos de procesamiento. También ofrece un conjunto amplio de puertos de entrada y salida de propósito general (GPIO, por sus siglas en inglés). Esto permite unificar en una sola placa el control de actuadores y la telemetría de red (Espressif Systems, 2023). La comunicación con el servidor se apoya en el

protocolo de transporte de telemetría para colas de mensajes (MQTT). Se trata de un protocolo de mensajería por publicación y suscripción, diseñado para redes de bajo ancho de banda y enlaces poco confiables, con niveles de calidad de servicio configurables (Banks y Gupta, 2014).

El desarrollo se enmarca, además, en el ordenamiento jurídico venezolano. El artículo 83 de la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela consagra la salud como derecho social fundamental y obligación del Estado (Asamblea Nacional de Venezuela, 1999). La Ley Orgánica de Salud establece que los servicios de salud deben garantizar la seguridad del paciente (Congreso Nacional de Venezuela, 1998). Por su parte, la Ley sobre Mensajes de Datos y Firmas Electrónicas regula la integridad de la información transmitida por medios electrónicos (Asamblea Nacional de Venezuela, 2001). Finalmente, la Ley Orgánica de Ciencia, Tecnología e Innovación promueve el desarrollo de soluciones tecnológicas nacionales orientadas al bienestar social (Asamblea Nacional de Venezuela, 2014).

A partir de lo expuesto se formuló la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo desarrollar un asistente robótico de medicación, con dispensación automatizada e interfaz multisensorial, que opere de forma autónoma y de bajo costo en el entorno domiciliario? El objetivo general fue desarrollar dicho asistente robótico. Los objetivos específicos fueron cuatro. El primero fue identificar las fallas y limitaciones de los sistemas de adherencia terapéutica existentes. El segundo, diseñar la arquitectura de equipos y programas requerida para automatizar la dispensación y el monitoreo remoto. El tercero, desarrollar un prototipo funcional que disponga automáticamente en un horario determinado, con una plataforma remota para planificar y monitorear las dosis. El cuarto, validar el funcionamiento del prototipo mediante pruebas de exactitud de dispensación, latencia de las notificaciones y consumo eléctrico.

Método

Tipo y diseño de la investigación

El estudio se inscribe en la investigación tecnológica, orientada al diseño, construcción y evaluación de un artefacto que resuelve un problema práctico. En esta modalidad, la teoría se valida a través de la praxis ingenieril en ciclos controlados (Bunge, 1997). El diseño corresponde a una validación técnica de laboratorio, de carácter descriptivo, sobre una unidad de prototipo. No se realizaron ensayos con seres humanos ni se recolectaron datos clínicos de pacientes. Por lo tanto, el estudio no evalúa la eficacia clínica del dispositivo sobre la adherencia, sino su desempeño funcional.

Marco de trabajo y fases de desarrollo

El ciclo de vida del desarrollo se organizó con el marco de trabajo ágil Scrum (Schwaber y Sutherland, 2020), en cuatro iteraciones o sprints de dos semanas, para un total de ocho semanas. El primer sprint abarcó la fabricación de la estructura y el control angular del motor.

El segundo se centró en la conectividad inalámbrica y la sincronización horaria. El tercero abordó la lógica de negocio del servidor y las alertas locales. El cuarto incluyó la validación de la toma mediante pulsador y la ejecución del protocolo de pruebas de esfuerzo. Cada iteración cerró con un incremento funcional verificable frente a los criterios de aceptación de las historias de usuario.

Arquitectura del sistema

El asistente se modeló como un sistema ciber-físico con separación estricta de responsabilidades en tres niveles. El nivel de aplicación corresponde al servidor web desarrollado en Django. Este servidor es responsable de la lógica de negocio, la persistencia relacional de las pautas médicas, la interfaz humano-máquina (HMI) y la autenticación por roles de administrador, cuidador y paciente. El nivel de *middleware* corresponde al intermediario o broker de mensajería MQTT, que gestiona el intercambio asíncrono bidireccional. El nivel de percepción y actuación corresponde al *firmware* del ESP32. Este interpreta las señales de entrada, comanda los actuadores electromecánicos y gobierna la interfaz multisensorial. La Figura 1 resume esta organización y los tópicos de mensajería empleados. En ella, el servidor publica el cronograma de dosis y las órdenes de carga en formato JSON. El nodo embebido los guarda localmente y devuelve el estatus de la toma y del motor a través del mismo intermediario de mensajería.

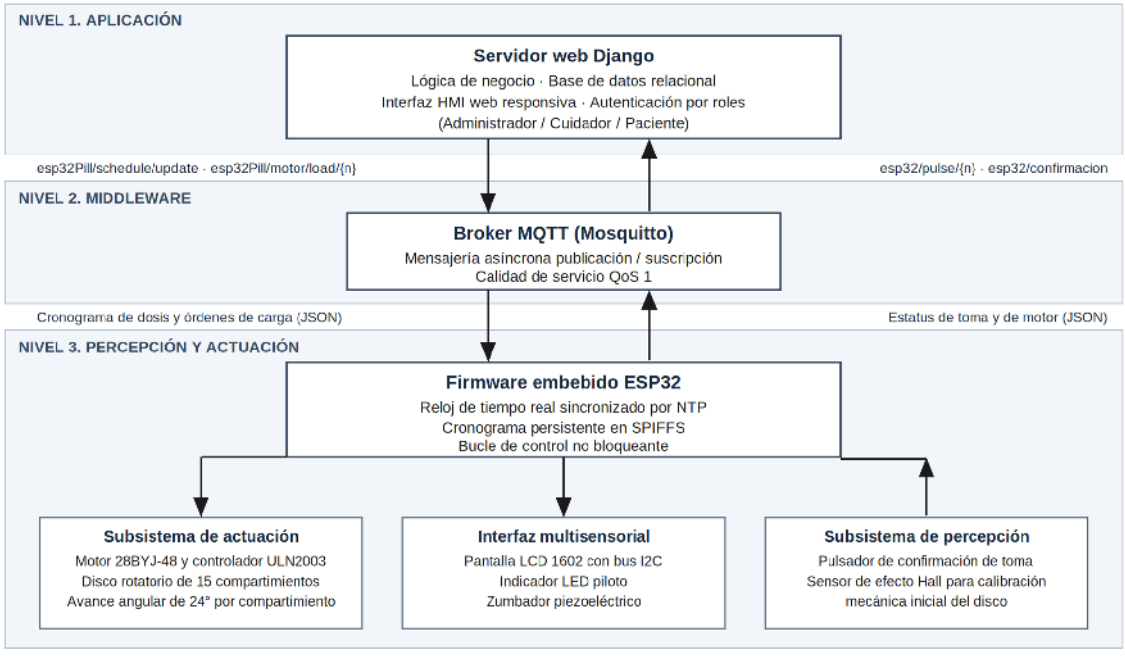


Figura 1: Arquitectura en tres niveles y flujo bidireccional de datos.
Fuente: Elaboración propia (2026).

Materiales y especificaciones técnicas

El prototipo se construyó con los siguientes elementos. El controlador es una tarjeta de desarrollo ESP32 NodeMCU alimentada a 5V mediante puerto USB. El actuador es un motor paso a paso unipolar 28BYJ-48 de 5V con su módulo controlador ULN2003. Éste se gobierna desde cuatro salidas digitales mediante la biblioteca AccelStepper, en configuración de cuatro hilos y secuencia de medio paso. El disco rotatorio de quince (15) compartimiento y su carcasa se fabricaron por impresión tridimensional en ácido poliláctico (PLA) de 1,75 mm. La interfaz incluye una pantalla de cristal líquido de 16 columnas por 2 filas con adaptador de bus I2C, un zumbador piezoeléctrico, un diodo emisor de luz (LED) piloto de 5 mm y un pulsador momentáneo. Además, un sensor de efecto Hall sirve como referencia de posición. Del lado del servidor se emplearon Django sobre Python, una base de datos relacional, un intermediario MQTT y la biblioteca cliente correspondiente en ambos extremos.

El disco distribuidor divide la circunferencia en quince (15) sectores iguales, de modo que el desplazamiento angular entre compartimientos consecutivos se obtiene mediante la ecuación 1

$$\theta_c = \frac{360^\circ}{N} = \frac{360^\circ}{15} = 24^\circ \tag{1}$$

donde θ_c es el avance angular por compartimiento y N el número total de compartimientos del disco. El motor 28BYJ-48 entrega 32 pasos por vuelta de su rotor interno y su tren de engranajes aplica una reducción cercana a 64:1, lo que equivale a unos 4096 medios pasos por vuelta del eje de salida. El número de medios pasos necesarios para desplazar un compartimiento se obtiene mediante la ecuación 2

$$np = \frac{4096 \cdot \theta_c}{360^\circ} = \frac{4096 \cdot 24^\circ}{360^\circ} \approx 273 \; \textit{medios pasos} \tag{2}$$

Dado que el cociente no es un número entero, el redondeo introduce un error de discretización de aproximadamente 0,006° por compartimiento. Este error acumula menos de 0,1° en una vuelta completa del disco, magnitud despreciable frente a la tolerancia angular del conducto de salida.

Requerimientos del sistema

Se definieron seis requerimientos funcionales. El primero es la sincronización horaria del nodo con un servidor de tiempo de red (NTP), según la especificación de Mills et al. (2010). Le siguen la programación remota de horarios y su asociación a compartimientos específicos, y la dispensación motorizada al ángulo correspondiente. También se incluyeron la activación simultánea de la interfaz multisensorial, la validación física de la toma mediante pulsador y el registro inmutable de cada evento en la base de datos. Los requerimientos no funcionales fueron cinco: uso de un protocolo de mensajería liviano; latencia máxima de 3 s entre la orden remota

y el inicio del giro; interfaz web adaptable a dispositivos móviles; estructura mecánica impresa en PLA con mínima fricción; y control de acceso por roles.

Definición operacional de las variables

El estudio evalúa el desempeño de un artefacto y no una relación causal entre variables. Por ello, los aspectos medidos se tratan como indicadores de desempeño, con definición operacional, instrumento de medida y criterio de aceptación previamente establecidos. Los factores controlados por el investigador fueron el compartimiento comandado, con valores de 1 a 15, y la condición de tráfico de la red local. La Tabla 1 sintetiza esta operacionalización.

Tabla 1: Operacionalización de los indicadores de desempeño evaluados.

Indicador	Definición operacional	Instrumento o procedimiento	Criterio de aceptación
Precisión de posicionamiento angular	Proporción de ciclos en los que el compartimiento comandado queda alineado con el conducto de salida, sin desviación ni atascamiento	Inspección visual directa contra marca de referencia; registro binario de éxito o falla	$\geq 95\,\%$ de los ciclos
Latencia extremo a extremo	Intervalo entre la publicación de la orden por el servidor y el inicio del giro del motor	Diferencia entre marcas de tiempo registradas en la bitácora del servidor y en el monitor serie del firmware	≤ 3s
Continuidad del enlace	Proporción de ciclos sin pérdida de mensajes ni desconexión no recuperada	Conteo de reconexiones y de mensajes entregados en la bitácora del intermediario	$100\,\%$ de los ciclos
Integridad del registro	Proporción de ciclos con inserción correcta del evento en la base de datos	Consulta a la tabla de historial médico	$100\,\%$ de los ciclos
Activación de la interfaz multisensorial	Proporción de ciclos con activación simultánea de pantalla, indicador luminoso y zumbador	Observación directa por dos observadores	$100\,\%$ de los ciclos
Consumo de corriente	Intensidad media demandada por el nodo a 5 V en cada modo de operación	Multímetro digital conectado en serie con la línea de alimentación	Carácter descriptivo

Nota: Los criterios de aceptación se fijaron antes de la ejecución de las pruebas.

Fuente: Elaboración propia (2026).

Procedimiento de validación y tratamiento de los datos

El prototipo se sometió a un protocolo de esfuerzo de cien (100) ciclos consecutivos de dispensación. Los ciclos se programaron con intervalos acelerados y se ejecutaron sobre una red local doméstica, bajo distintas condiciones de tráfico. Cada ciclo comprendió la orden remota, el giro del motor, la activación de las alertas, la confirmación simulada de la toma y el registro en la base de datos. Adicionalmente, se efectuaron dos ensayos específicos de tolerancia a fallos. El primero consistió en desconectar deliberadamente el intermediario de mensajería durante el horario de una dosis. El segundo, en interrumpir abruptamente el suministro eléctrico durante un ciclo de rotación. Los resultados se analizaron con estadística descriptiva. Las proporciones de éxito se acompañan de su intervalo de confianza del $95\,\%$ calculado por el método de Wilson,

a fin de expresar la incertidumbre asociada al tamaño de la muestra de ciclos. La latencia se resume mediante su valor medio y el valor extremo observado.

Consideraciones éticas

La investigación no involucró participantes humanos, muestras biológicas ni datos personales de salud. La totalidad de los ensayos se realizó sobre el prototipo con dosis simuladas. El dispositivo constituye un prototipo académico de nivel experimental. No cuenta con registro sanitario ante el Servicio Autónomo de Contraloría Sanitaria ni con certificación de biocompatibilidad de sus materiales. Por lo tanto, no debe emplearse en la administración real de medicamentos a pacientes.

Resultados

Prototipo mínimo viable obtenido

Se obtuvo un prototipo mínimo viable funcional que almacena los medicamentos en quince (15) compartimiento rotativos. El prototipo se dispensa de forma motorizada, sincronizado con la hora obtenida por NTP, y emite alertas locales visuales y sonoras. Además, permite programar los horarios de forma remota desde la plataforma web y registra el estatus de cada toma. La distribución de las conexiones físicas sobre los puertos de entrada y salida del microcontrolador se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2: Asignación de los puertos GPIO del microcontrolador a los componentes periféricos

Componente	Puerto (GPIO)	Configuración	Función
Indicador LED piloto	2	Salida digital	Destella de forma intermitente para orientar visualmente al paciente
Zumbador piezoeléctrico	15	Salida digital con modulación por ancho de pulso	Emite el tono de alerta, audible a 5 m en un ambiente doméstico
Motor 28BYJ-48, entradas IN1 a IN4 del módulo ULN2003	19, 18, 5 y 23	Salidas digitales	Excitan las cuatro bobinas en secuencia de medio paso, y determinan el desplazamiento angular, la velocidad y el sentido de giro del disco
Pantalla LCD 1602, línea SDA	21	Bus I2C	Transmite los datos del mensaje mostrado al paciente
Pantalla LCD 1602, línea SCL	22	Bus I2C	Transmite la señal de reloj del bus de comunicación
Pulsador de confirmación	4	Entrada digital con resistencia interna en modo pull-up	Registra el retiro de la dosis y detiene las alertas locales
Sensor de efecto Hall	33	Entrada digital con resistencia interna en modo pull-up	Detecta la marca física del disco y fija la posición de referencia

Nota. GPIO: puertos de entrada y salida de propósito general. LCD: pantalla de cristal líquido.

Fuente: Elaboración propia (2026).

Algoritmo de control descentralizado

Se descartó el esquema cliente-servidor estricto, en el que el microcontrolador actúa como actuador dependiente del servidor. En su lugar, se adoptó una arquitectura descentralizada. En ella, el nodo conserva el cronograma en memoria no volátil (SPIFFS) y evalúa las alarmas contra su propio reloj de tiempo real. La mensajería se emplea únicamente para actualizar el cronograma y para publicar el estatus. La Figura 2 presenta el algoritmo implementado, incluida la calibración mecánica inicial o homing y la ventana crítica de validación. La calibración inicial fija el compartimiento 1 como posición de referencia. Como las alarmas se evalúan contra el reloj interno, la dispensación no depende del enlace de red.

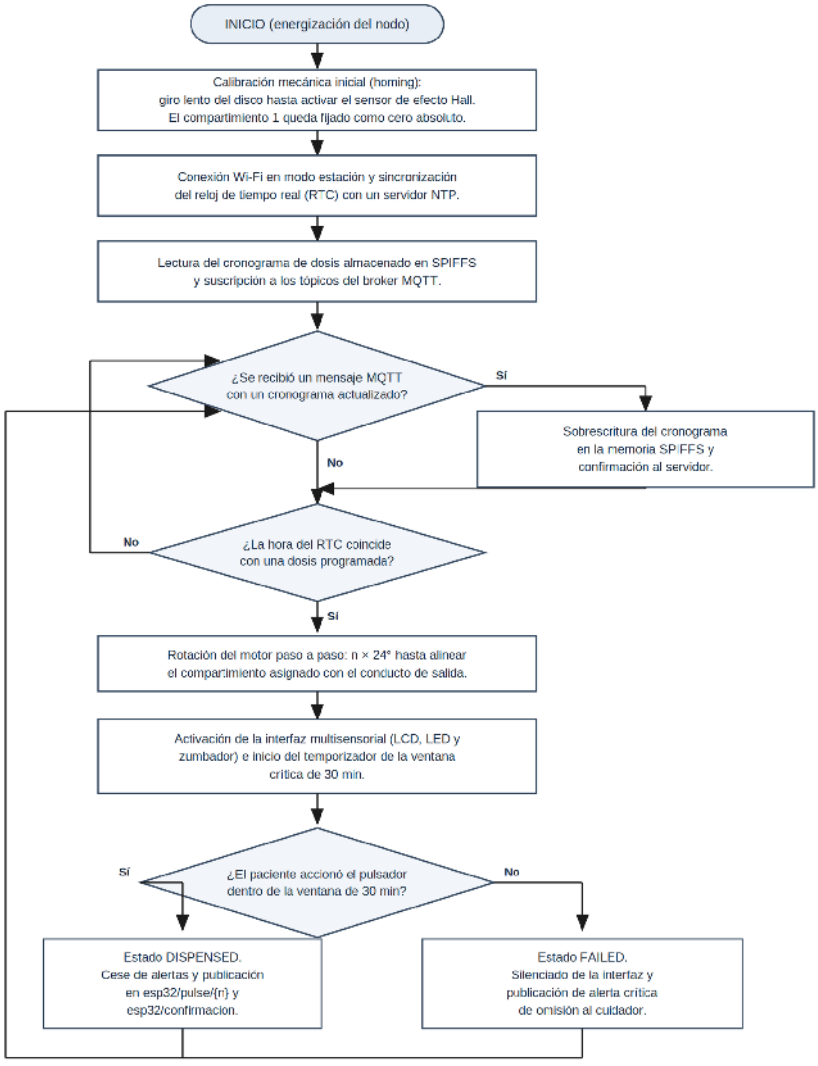


Figura 2: Algoritmo de control descentralizado del firmware.
Fuente: Elaboración propia (2026).

Desempeño en el protocolo de esfuerzo

La Tabla 3 resume los resultados de los cien (100) ciclos consecutivos de dispensación para cada indicador evaluado.

Tabla 3: Resultados del protocolo de esfuerzo de cien ciclos consecutivos de dispensación.

Indicador	Éxitos	Fallas	Éxito (IC 95 %)	Observaciones
Precisión de posicionamiento angular	98	2	98,0 % (93,0–99,4)	Ambas fallas se debieron a un roce del PLA en el compartimiento 5. Tras limar la rebaba no se repitieron
Continuidad del enlace	100	0	100 % (96,3–100)	No se registraron pérdidas de mensajes; la rutina automática de reconexión se ejecutó sin incidencias
Latencia extremo a extremo ($\leq$ 3 s)	99	1	99,0 % (94,6–99,8)	Un valor extremo de 4,2 s coincidió con un episodio de congestión del enrutador local. La latencia media fue de 0,82 s
Integridad del registro	100	0	100 % (96,3–100)	El proceso de escucha insertó el evento en la tabla de historial en todos los ciclos
Activación de la interfaz multisensorial	100	0	100 % (96,3–100)	Activación simultánea de zumbador, indicador luminoso y pantalla en todos los disparos

Nota. IC 95 %: intervalo de confianza del 95 % calculado por el método de Wilson.

Fuente: Elaboración propia (2026).

Tolerancia a fallos

Durante la desconexión deliberada del intermediario de mensajería, el prototipo dispensó las dosis programadas. Para ello se apoyó exclusivamente en el cronograma almacenado en memoria no volátil y en su reloj interno. Esto confirma la independencia operativa del nodo respecto del servidor. En los ensayos de corte abrupto del suministro eléctrico durante la rotación, la subrutina de calibración ejecutada al reiniciar reubicó el disco en la posición de referencia. Así se evitó el desfase de compartimientos característico de los sistemas de lazo abierto sin sensor de posición.

Consumo eléctrico

El consumo de corriente se caracterizó en tres modos de operación del *firmware*, según se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4: Consumo medio de corriente del nodo embebido a 5 V por modo de operación.

Modo de operación	Corriente media	Condición del sistema
Espera conectado	≈ 120 mA	Enlace inalámbrico activo y pantalla encendida con el mensaje de disponibilidad
Activo crítico	≈ 280 mA (pico)	Giro del motor, zumbador intermitente y retroiluminación de la pantalla de forma simultánea
Reposo profundo	≈ 15µA	Modo forzado experimentalmente, con el enlace inalámbrico y la pantalla desactivados

Nota. El modo de reposo profundo se forzó de manera experimental y no se emplea en la versión actual del prototipo.

Fuente: Elaboración propia (2026).

El pico de 280 mA es coherente con el consumo nominal declarado para el 28BYJ-48 alimentado a 5V con todas sus bobinas excitadas. Este pico se atribuye al par requerido para vencer la inercia estática del disco. La diferencia de cuatro órdenes de magnitud respecto del modo de reposo profundo indica que la alimentación por batería es viable. Para ello, debe restringir el tiempo de permanencia en el modo de espera conectado.

Discusión

La precisión de posicionamiento angular alcanzó una proporción puntual de 98,0 %, superior al criterio de aceptación de 95 % fijado antes de las pruebas. No obstante, el límite inferior del intervalo de confianza, de 93,0 %, queda por debajo de dicho umbral. Por ello, con cien (100) ciclos no puede afirmarse con confianza estadística que el desempeño real supere el 95 %. Además, ambas fallas se concentraron en un mismo compartimiento y obedecieron a una rebaba del proceso de impresión, corregida durante el propio ensayo. Se trata, por tanto, de un defecto de fabricación localizado y no de una limitación del principio de control empleado. Una estimación más firme requerirá repetir el protocolo, con la pieza ya rectificada y un número mayor de ciclos.

Conviene señalar una fuente sistemática de desviación propia del actuador seleccionado. La relación de reducción real del tren de engranajes del 28BYJ-48 es de 63,684:1 y no de 64:1, valor nominal que suele adoptarse al configurar el firmware. Si se emplea la cifra redondeada, se introduce un error sistemático inferior al 0,5 % por vuelta del disco. Esto equivale a menos de 2° acumulados en los quince (15) compartimiento. Esta desviación no explica las fallas registradas, que fueron de origen mecánico y quedaron localizadas en una sola pieza. Sin embargo, constituye un factor a controlar si se aumenta el número de compartimientos o se reduce la holgura del conducto de salida. La rutina de calibración al arranque impide que dicho error se acumule entre encendidos sucesivos.

La latencia media de 0,82 s se sitúa muy por debajo del límite de 3 s establecido. El único

valor que lo excedió, de 4,2 s, coincidió con congestión del enrutador local. Conviene precisar el alcance de este indicador. Como la evaluación de las alarmas se realiza contra el reloj interno del nodo, la latencia de red no afecta la puntualidad de la dispensación. Solo afecta la propagación de las órdenes de reprogramación y de las notificaciones hacia el cuidador. Este desacoplamiento entre la temporización clínica y la disponibilidad de la red constituye la principal diferencia de diseño respecto de los antecedentes revisados (Arango et al., 2022; Moscoso y Villacrés, 2020). En ellos, el dispositivo depende del enlace para ejecutar la acción física.

El comportamiento observado es coherente con las propiedades atribuidas a los protocolos de publicación y suscripción para redes restringidas (Banks y Gupta, 2014). Sin embargo, este estudio no realizó una comparación experimental frente a un esquema de sondeo periódico sobre HTTP. Por lo tanto, no puede sostenerse una afirmación de superioridad medida entre ambas alternativas. La elección del protocolo se sustenta en la especificación y en la literatura, no en una prueba comparativa propia.

Frente a los dispositivos comerciales analizados, el prototipo incorpora dos elementos ausentes en aquellos. El primero es la calibración mecánica al arranque, que elimina el desfase de compartimientos tras un corte eléctrico. El segundo es el cierre del ciclo mediante confirmación física del paciente, que convierte la apertura de una tapa en un evento auditable y con marca de tiempo. Debe subrayarse, sin embargo, que la pulsación del botón acredita el retiro de la dosis, no su ingestión. Esta distinción delimita con precisión lo que el sistema puede y no puede garantizar, y coincide con la limitación reconocida en los sistemas pasivos revisados. La verificación de la ingesta excede el alcance de un dispositivo de esta categoría.

Respecto de la accesibilidad, el uso de equipos de diseño abierto y programas de código libre elimina la dependencia de suscripciones mensuales. Este factor se identificó como barrera de adopción en las soluciones comerciales. El argumento se sostiene sobre la composición de materiales del prototipo. Su traducción en un costo unitario comparable con el de los productos del mercado no fue objeto de un estudio económico formal en esta investigación.

Limitaciones del estudio

A continuación se nombran las limitaciones de la experiencia. En primer lugar, se evaluó una única unidad de prototipo, por lo que no puede estimarse la variabilidad entre ejemplares fabricados. El protocolo se ejecutó en una red local controlada y en un lapso corto; y no se evaluó el desempeño en un uso domiciliario prolongado ni ante fallas sostenidas del suministro eléctrico.

No se realizaron pruebas con pacientes reales, de modo que la investigación no aporta evidencia sobre la mejora efectiva de la adherencia terapéutica ni sobre la usabilidad en adultos mayores. Por otra parte, el sistema confirma el retiro de la dosis, no su ingestión; ya que no

incorpora celda de carga ni sensor de presencia del comprimido.

En cuanto a la seguridad, la comunicación se implementó sin cifrado de transporte y la plataforma sin autenticación de doble factor, condiciones aceptables para un prototipo de laboratorio pero insuficientes para el manejo de datos de salud. Finalmente, el PLA empleado no es un polímero de grado médico, por lo que el prototipo no es apto para el contacto prolongado con fármacos destinados al consumo humano.

Conclusiones

Se desarrolló un asistente robótico de medicación funcional que integra un mecanismo de dispensación automatizado de quince (15) compartimentos, con un avance angular de 24° por compartimiento, y una interfaz multisensorial de alertas visuales y sonoras. La arquitectura en tres niveles, con el cronograma persistido en el nodo embebido, permite que la dispensación se ejecute con independencia del enlace de red y del servidor.

En cuanto al desempeño técnico, la calibración mecánica al arranque suprimió el desfase de compartimientos tras interrupciones del suministro eléctrico. De este modo, en cien (100) ciclos consecutivos, la precisión de posicionamiento angular fue de 98,0 %, con un intervalo de confianza del 95 % de 93,0 % a 99,4 %, mientras que la latencia media entre la orden remota y el inicio del giro fue de 0,82 s.

La continuidad del enlace, la integridad del registro y la activación de la interfaz multisensorial alcanzaron 100 % de los ciclos. El consumo se ubicó entre 120 mA en espera y 280 mA en pico, con 15 µA en reposo profundo, lo que hace viable una alimentación por batería en versiones posteriores.

Finalmente, se demostró que es técnicamente viable construir un dispositivo de teleasistencia domiciliaria con equipos de diseño abierto y programas de código libre. No obstante, la eficacia clínica del dispositivo sobre la adherencia terapéutica no fue evaluada y constituye una línea de trabajo inmediata.

Recomendaciones

Se propone repetir el protocolo de esfuerzo con la pieza rectificada y un número mayor de ciclos, e incorporar la medición automatizada de la latencia con registro de su dispersión. Asimismo, se sugiere realizar un estudio de campo con pacientes polimedicados durante un mínimo de 30 días, con medición de adherencia y de usabilidad. Resulta fundamental incorporar cifrado de transporte en la mensajería y autenticación de doble factor en la plataforma antes de cualquier manejo de datos reales de salud.

Se recomienda sustituir el PLA por un polímero de grado médico y evaluar la incorporación de una celda de carga que verifique la caída efectiva del comprimido, así como también añadir un respaldo por batería recargable que preserve el reloj interno y el cronograma ante cortes prolongados del suministro eléctrico.

Referencias

Arango, K., Ortegón, J., y Ospina, A. (2022). *Pastillero inteligente para medicamentos basado en internet de las cosas* [Trabajo de grado]. Universidad de Manizales, Colombia. https://ridum.umanizales.edu.co/server/api/core/bitstreams/873645c0-ef55-4444-b16f-9ecbf5b8e302/content

Arriagada, L., Carrasco, T., y Araya, M. (2020). Polifarmacia y deprescripción en personas mayores. *Revista Médica Clínica Las Condes*, *31*(2), 204-210. https://doi.org/10.1016/j.rmclc.2020.02.007

Asamblea Nacional de Venezuela. (1999). *Constitución de la República Bolivariana de Venezuela*. Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N.° 36.860 (Extraordinaria), 30 de diciembre de 1999.

Asamblea Nacional de Venezuela. (2001). *Ley sobre Mensajes de Datos y Firmas Electrónicas*. Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N.° 37.148, 28 de febrero de 2001.

Asamblea Nacional de Venezuela. (2014). *Ley Orgánica de Ciencia, Tecnología e Innovación*. Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N.° 6.151 (Extraordinaria), 18 de noviembre de 2014.

Banks, A., y Gupta, R. (2014). *MQTT version 3.1.1 (OASIS Standard)*. OASIS. http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html

Benedetti, F., Acuña, J., y Fabiani, B. (2022). *Teleasistencia: Innovaciones tecnológicas para el cuidado de personas a distancia*. Banco Interamericano de Desarrollo. https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Teleasistencia-innovaciones-tecnologicas-para-el-cuidado-de-personas-a-distancia.pdf

Bunge, M. (1997). *Ciencia, técnica y desarrollo (2.ª ed.)* Sudamericana. https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Teleasistencia-innovaciones-tecnologicas-para-el-cuidado-de-personas-a-distancia.pdf

Congreso Nacional de Venezuela. (1998). *Ley Orgánica de Salud*. Gaceta Oficial de la República de Venezuela N.° 36.579, 11 de noviembre de 1998.

Espressif Systems. (2023). *ESP32 series datasheet*. Espressif Systems. https://documentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.pdf

Mills, D., Martin, J., Burbank, J., y Kasch, W. (2010). *Network time protocol version 4: Protocol and algorithms specification (RFC 5905)*. Internet Engineering Task ForceInternet Engineering Task Force. https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5905

Moscoso, S., y Villacrés, K. (2020). *Diseño e implementación de un prototipo de máquina dispensadora de medicamentos en forma de pastillas para personas de la tercera edad que padecen enfermedades no transmisibles* [Trabajo de titulación de grado]. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18879

Organización Mundial de la Salud. (2003). *Adherencia a los tratamientos a largo plazo: Pruebas para la acción.*

Schwaber, K., y Sutherland, J. (2020). *La guía Scrum: La guía definitiva de Scrum: Las reglas del juego.* Scrum.org. https://scrumguides.org/docs/scrumguide/v2020/2020-Scrum-Guide-Spanish-European.pdf

Confianza organizacional y adopción ágil en el sector público: Caso Trolebús Mérida

Confiança organizacional e adoção ágil no setor público: Caso Trolebús Mérida

Organizational trust and agile adoption in the public sector: Trolebús Mérida case

Ariadn Carrasquero [1]
Verónica Ordoñez [2]
Ana Velásquez [3]
Massiel Poleo [4]
Anderson Ramírez [5]
Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.[1]
Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Miranda, Venezuela[2]
Centro de Investigaciones de Astronomía y Tecnologías Aplicadas Francisco J. Duarte, Mérida, Venezuela[3]
Centro Nacional de Tecnologías Ópticas, Mérida, Venezuela[3]
Universidad Bolivariana de Venezuela, Barinas, Venezuela[4]
Trolebús de Mérida C.A., Mérida, Venezuela[5]
aavelasqu2015@gmail.com[1]
vcop2000@gmail.com[2]
anita.velasquezv@gmail.com[3]
poleomc1@gmail.com[4]
andersonelectrica@gmail.com[5]

Fecha de recepción: 06/08/2026
Fecha de aceptación: 30/10/2026
Pág: 92 – 112
DOI: 10.5281/zenodo.23887639

Resumen

La adopción de enfoques ágiles en organizaciones públicas enfrenta barreras asociadas con estructuras formalizadas, control procedimental y baja visibilidad de los procesos tecnológicos. Este estudio analiza cómo la construcción progresiva de confianza organizacional favoreció la transición hacia prácticas adaptativas en el equipo de tecnologías de información (TI) de Trolebús Mérida, C.A. (Tromerca), empresa estatal venezolana del sector transporte.

Esta obra está bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0.

Se desarrolló un estudio de caso de orientación cualitativa, con apoyo de evidencia cuantitativa descriptiva. La estrategia de recolección integró observación participante, revisión documental y un cuestionario de percepción con escala Likert de cinco niveles, aplicado a ocho participantes: tres integrantes del equipo de TI y cinco representantes de gerencia y otras partes interesadas (*stakeholders*). Los resultados muestran que la transparencia del proceso, la fragmentación de entregables, la comunicación continua, la validación interna y la autoorganización redujeron la incertidumbre y favorecieron una delegación progresiva de decisiones técnicas. Se propone un modelo de confianza articulado en cinco dimensiones: cognitiva, técnica, operativa, relacional e interna, así como una hoja de ruta de cinco fases para su construcción en contextos públicos. El caso sugiere que la adopción de prácticas ágiles puede iniciarse mediante transformaciones operativas y relacionales antes de introducir cambios metodológicos o estructurales formales.

Palabras clave: confianza organizacional, estudio de caso, gestión pública, metodologías ágiles, proyectos de TI.

Resumo

A adoção de abordagens ágeis em organizações públicas enfrenta barreiras associadas a estruturas formalizadas, controle procedimental e baixa visibilidade dos processos tecnológicos. Este estudo analisa como a construção progressiva de confiança organizacional favoreceu a transição para práticas adaptativas na equipe de tecnologia da informação (TI) da Trolebús Mérida, C.A. (Tromerca), empresa estatal venezuelana do setor de transportes. Foi realizado um estudo de caso de natureza qualitativa, com o suporte de evidências quantitativas descritivas. A estratégia de coleta de dados integrou observação participante, revisão documental e um questionário de percepção com escala Likert de cinco níveis, aplicado a oito participantes: três integrantes da equipe de TI e cinco representantes da gerência e de outras partes interessadas (*stakeholders*). Os resultados mostram que a transparência do processo, a fragmentação das entregas, a comunicação contínua, a validação interna e a auto-organização reduziram a incerteza e favoreceram uma delegação progressiva de decisões técnicas. Propõe-se um modelo de confiança estruturado em cinco dimensões: cognitiva, técnica, operacional, relacional e interna; bem como um roteiro de cinco fases para sua construção em contextos públicos. O caso sugere que a adoção de práticas ágeis pode ser iniciada por meio de transformações operacionais e relacionais, antes da introdução de mudanças metodológicas ou estruturais formais.

Palavras-chave: confiança organizacional, estudo de caso, gestão pública, metodologias ágeis, projetos de TI.

Abstract

The adoption of agile approaches in public organizations faces barriers associated with formalized structures, procedural control, and limited visibility of technology processes. This study analyzes how the progressive construction of organizational trust supported the transition toward adaptive practices in the information technology team of Trolebús Mérida, C.A. (Tromerca), a Venezuelan state-owned public transportation company. A qualitative case study was conducted, supported by descriptive quantitative evidence. Data collection integrated participant observation, document review, and a five-point Likert perception questionnaire administered to eight participants: three IT team members and five management and stakeholder representatives. The findings show that process transparency, deliverable fragmentation, continuous communication, internal validation, and team self-organization reduced uncertainty and supported the progressive delegation of technical decisions. The study proposes a trust model structured around five dimensions: cognitive, technical, operational, relational, and internal, together with a five-phase roadmap for building trust in public-sector contexts. The case suggests that agile practices can be initiated through operational and relational transformations before introducing formal methodological or structural changes.

Keywords: organizational trust, case study, public management, agile methodologies, IT projects.

Introducción

La gestión de proyectos tecnológicos en organizaciones públicas se desarrolla en un entorno donde la necesidad de transparencia y rendición de cuentas convive con estructuras jerárquicas, procedimientos formalizados y múltiples instancias de validación. En este contexto, el control constituye un mecanismo legítimo para reducir riesgos, pero puede generar efectos no deseados cuando la información sobre el proceso de desarrollo es limitada. La gerencia puede terminar recibiendo evidencia principalmente al final de ciclos extensos, mientras el equipo técnico trabaja con poca retroalimentación durante la ejecución (Mergel et al., 2021; Tai y Awasthi, 2025). El resultado es una relación caracterizada por la incertidumbre, la dependencia de revisiones posteriores y una autonomía operativa limitada. En la gestión pública, esta tensión es especialmente visible en proyectos de tecnologías de información (TI) porque los productos

suelen ser intangibles, su construcción requiere conocimiento especializado y los resultados pueden modificarse durante la ejecución. Cuando la gerencia no dispone de mecanismos sencillos para observar el avance, la documentación y las aprobaciones pueden convertirse en sustitutos de la visibilidad técnica. El problema reside en que los controles sean capaces de ofrecer información útil y oportuna para decidir.

La literatura sobre gestión de proyectos y adopción de enfoques ágiles ha señalado que los contextos públicos presentan dificultades particulares para incorporar prácticas adaptativas. Entre ellas se encuentran la cultura jerárquica, la rigidez normativa y la resistencia organizacional al cambio (Baxter et al., 2023; Vacari y Prikladnicki, 2015). Asimismo, se ha señalado que la confianza y la comunicación son condiciones relevantes para que los equipos puedan trabajar con mayor autonomía y responder a cambios sin apartarse de los procedimientos institucionales (Nuottila et al., 2016; Tyagi et al., 2022). Sin embargo, identificar estas condiciones no explica por sí mismo cómo se construyen en una organización concreta. Desde la perspectiva de la gestión de proyectos, los enfoques predictivos se apoyan en una planificación detallada y tienden a concentrar la entrega de valor hacia etapas posteriores, mientras que los enfoques adaptativos trabajan mediante ciclos iterativos y entregas incrementales que permiten ajustar el alcance a partir de la retroalimentación (*Project Management Institute*, PMI, 2021). La diferencia resulta relevante para el caso estudiado porque la discusión se centra en comprender qué condiciones permiten que un equipo pueda trabajar con ciclos más cortos en una institución que conserva estructuras formales.

El caso de Trolebús Mérida, C.A. (Tromerca) permite observar este proceso a partir de la evolución de un mismo equipo de TI en dos proyectos consecutivos. El Sistema de Control de Gasoil comenzó bajo una dinámica tradicional, con entregas integrales y validaciones concentradas en etapas posteriores. Durante su desarrollo, el equipo implementó prácticas destinadas a hacer visible el proceso, simplificar la comunicación y asegurar internamente la calidad de los resultados. Posteriormente, durante el desarrollo del Sistema de Control de Unidades y Averías, se observó una dinámica diferente: ciclos de trabajo más cortos, validación continua, interacción directa y mayor autonomía técnica. Tromerca constituye un escenario pertinente para este análisis porque presta un servicio público de transporte y desarrolla soluciones tecnológicas vinculadas con su operación. En este tipo de organización, el valor de un proyecto de TI trasciende el software producido, pues se fundamenta en su capacidad para apoyar la continuidad operativa, facilitar la toma de decisiones y responder a incidentes. Por ello, la oportunidad de la retroalimentación y la flexibilidad en la adaptación de los requerimientos adquieren importancia práctica.

El interés del estudio se centra en analizar el papel de la confianza como condición organizacional para modificar las dinámicas de trabajo, más allá de una comparación general entre los enfoques tradicionales y ágiles. Se parte de la premisa de que la confianza se construye mediante evidencias observables de competencia, consistencia, comunicación y autogestión.

En consecuencia, el objetivo principal de la investigación consistió en analizar los factores de confianza que facilitaron la adopción de prácticas adaptativas en el equipo de TI de Tromerca, así como identificar una secuencia de acciones para orientar procesos similares en organizaciones públicas. Para ello, se desarrolló un estudio de caso de orientación cualitativa, apoyado en evidencia cuantitativa descriptiva, que integró observación participante, revisión documental y un cuestionario de percepción. El concepto de confianza utilizado se concibe como un fenómeno multidimensional. Mayer et al. (1995) plantean un modelo integrador en el que la confianza se relaciona con la percepción de habilidad, benevolencia e integridad, mientras que McAllister (1995) distingue entre una dimensión cognitiva y una afectiva. Para el contexto de proyectos de TI, estos planteamientos requieren una traducción operativa: la competencia se observa en la calidad de las soluciones, la consistencia en el cumplimiento, la relación en la comunicación y la autogestión en la coordinación del trabajo por parte del equipo.

El estudio plantea como aporte concebir la confianza organizacional como un activo estratégico, integrando su dimensión interpersonal habitual. Esta perspectiva permite interpretar la transición desde una dinámica de "caja negra", donde la gerencia conoce principalmente las entradas y los resultados finales, hacia una de "caja transparente" (Pressman y Maxim, 2020; Schwaber y Sutherland, 2020), caracterizada por la visibilidad y verificabilidad de los avances durante la ejecución. El propósito radica en reconfigurar el control institucional a partir del acceso progresivo a la información sobre el desempeño. La noción de "caja negra" permite estructurar esta transición: en ingeniería y desarrollo de software representa un sistema centrado en las entradas y salidas sin focalizarse en el proceso interno (Pressman y Maxim, 2020). En una organización pública, al operar bajo esta lógica, la gerencia percibe exclusivamente los requerimientos y el producto entregado. Por su parte, la alternativa de "caja transparente" busca enfocar la atención en los elementos clave para comprender el estado del proyecto, validar los resultados parciales y tomar decisiones oportunas, manteniendo un nivel adecuado de detalle técnico.

Marco teórico referencial

La confianza organizacional ha sido definida como la disposición de una parte a ser vulnerable ante las acciones de otra, sobre la base de la expectativa de que esta realizará una acción relevante para quien confía, con independencia de la capacidad de supervisarla o controlarla (Mayer et al., 1995). Esta definición resulta pertinente para la gestión pública porque sitúa la confianza precisamente donde el control directo es limitado. Mayer et al. (1995), identifican tres antecedentes de la confiabilidad percibida: la habilidad, entendida como el conjunto de competencias que permiten influir en un dominio específico; la benevolencia, o grado en que se percibe que la otra parte actúa en favor de quien confía; y la integridad, referida a la adhesión a principios que quien confía considera aceptables. A este planteamiento se suma la perspectiva institucional de Bachmann e Inkpen 2011, quienes muestran que la confianza depende de arreglos institucionales que reducen la incertidumbre sobre el comportamiento del

otro. En organizaciones públicas, donde los procedimientos formales son constitutivos de la acción, esta lectura permite entender la confianza como un fenómeno que puede construirse dentro de la institucionalidad y no al margen de ella.

La confianza interpersonal, por su parte, es la que un individuo deposita en otro individuo concreto. Zaheer et al. (1998), la distinguen de la confianza interorganizacional, dirigida a una organización como colectivo, y muestran que ambos niveles están relacionados, pero no son equivalentes ni cumplen la misma función en el desempeño de las relaciones. Aunque ese planteamiento surge del estudio de relaciones entre organizaciones, la distinción resulta útil para este caso: la confianza interpersonal se manifiesta en la relación cotidiana entre el líder operativo del equipo y la gerencia, mientras que la confianza organizacional se expresa en la disposición institucional a delegar decisiones técnicas en el equipo. McAllister (1995), distingue además entre una confianza basada en la cognición, sustentada en evidencias de competencia y confiabilidad, y una confianza basada en el afecto, fundada en vínculos de preocupación genuina por el otro. En el ámbito de los equipos ágiles, Tyagi et al. (2022), identificaron factores de confianza asociados al entorno de trabajo, el liderazgo, las condiciones organizacionales, los atributos personales y el contexto sociocultural, y los vincularon con la habilidad, la benevolencia y la integridad del modelo de Mayer et al. (1995).

En cuanto a los fundamentos de la agilidad, los enfoques ágiles organizan el trabajo en ciclos iterativos y entregas incrementales, con retroalimentación frecuente de los interesados y adaptación progresiva del alcance (PMI, 2021). Scrum, uno de los marcos más difundidos, se fundamenta en el empirismo y en tres pilares: transparencia, inspección y adaptación; el trabajo se organiza en ciclos de duración fija, denominados sprints, al final de los cuales el equipo presenta un incremento utilizable para su revisión (Schwaber y Sutherland, 2020). La Figura 1 ilustra este funcionamiento en el desarrollo de software y lo contrasta con un esquema secuencial tradicional, en el que la validación se concentra al final del proceso. En el ámbito público, Mergel et al. (2021), sostienen que la agilidad constituye una nueva forma de gobernar, que trasciende el desarrollo de software y alcanza la gestión de las organizaciones públicas. En la misma línea, Tai y Awasthi (2025), distinguen tres niveles de análisis de la agilidad gubernamental: micro (gestión de proyectos), meso (gestión organizacional) y macro (estructura de gobernanza), y observan que su aplicación varía considerablemente porque las organizaciones procuran ajustarla a los sistemas burocráticos existentes.

Finalmente, la adopción de prácticas ágiles se inscribe en los procesos de gobierno digital y transformación digital del Estado. En este marco, la transformación digital ha sido caracterizada como “un proceso continuo, estratégico, disruptivo y de adaptación cultural” (Secretaría de Gobierno y Transformación Digital, citada en Huamán y Medina, 2022, p. 98). Desde una perspectiva organizacional, Haug et al. (2024), concluyen, a partir de una revisión sistemática de estudios empíricos, que el cambio inducido por la tecnología digital en el sector público depende de condiciones internas como la escala, el financiamiento, la cultura innovadora y las

capacidades del personal, y distinguen entre cambios incrementales, que afectan áreas y flujos de trabajo específicos, y cambios transformadores, que reorganizan la institución en su conjunto. Esta distinción resulta útil para el caso estudiado, en el que la transformación se inició en una unidad de trabajo.

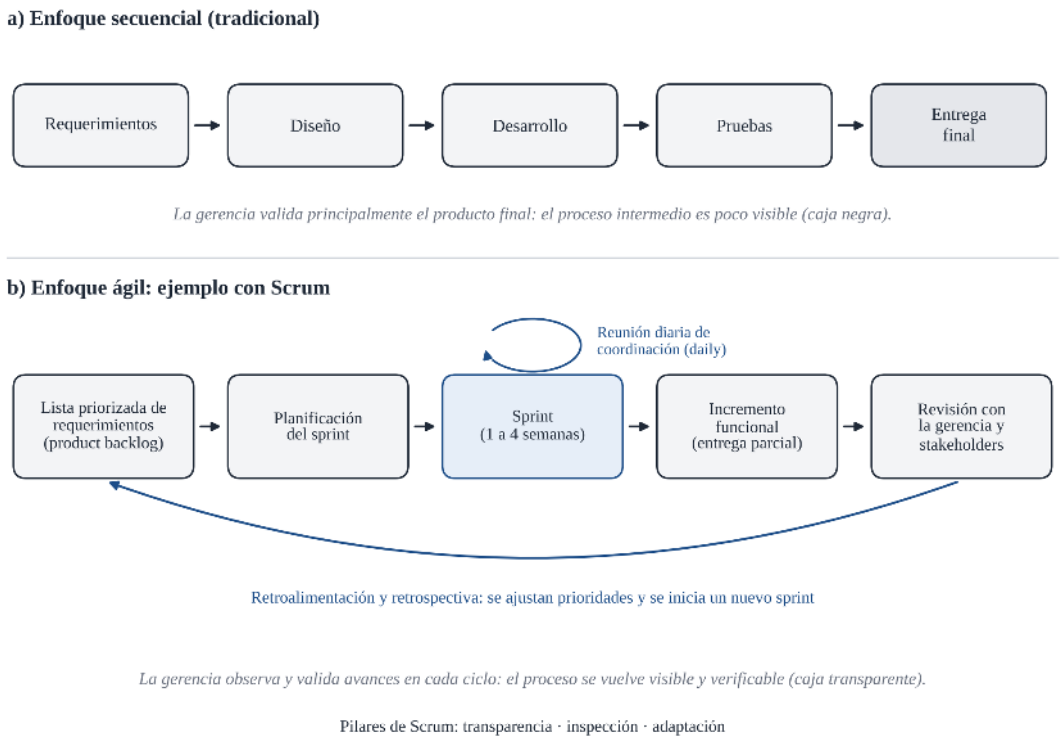


Figura 1: Funcionamiento de un enfoque ágil (Scrum) frente a un enfoque secuencial
Fuente: Elaboración propia a partir de Schwaber y Sutherland (2020) y PMI (2021). Diagrama elaborado con apoyo de Claude (Anthropic, 2026), a partir de contenidos definidos en la investigación.

Método

Se desarrolló un estudio de caso de orientación cualitativa, con apoyo de evidencia cuantitativa descriptiva. El diseño se seleccionó porque el fenómeno de interés, la construcción de confianza y su relación con cambios en la dinámica de trabajo, se encuentra estrechamente vinculado con las condiciones organizacionales en las que ocurre y no puede aislarse de ellas. El análisis se concentró en la experiencia del equipo de TI de Tromerca durante el desarrollo del Sistema de Control de Gasoil y su posterior transición hacia prácticas adaptativas en el Sistema de Control de Unidades y Averías.

La investigación se ubicó en un nivel descriptivo e interpretativo. El componente descriptivo permitió caracterizar las prácticas y respuestas observadas; el interpretativo permitió relacionarlas con las dimensiones de confianza y con la evolución de la autonomía del equipo. El estudio se orientó a explicar cómo determinadas prácticas se asociaron con cambios observables en la interacción organizacional, priorizando este enfoque analítico sobre la prueba de hipótesis mediante procedimientos inferenciales.

La experiencia analizada comprendió dos momentos. El primero correspondió al Sistema de Control de Gasoil, utilizado como antecedente detonante porque en él se evidenció la necesidad de aumentar la visibilidad y mejorar la interacción. El segundo correspondió al Sistema de Control de Unidades y Averías, en el que las condiciones de confianza previamente construidas facilitaron desde etapas tempranas una dinámica de trabajo más cercana a los principios adaptativos. La comparación entre ambos momentos se utilizó como estrategia analítica dentro del mismo caso y no como comparación experimental entre metodologías.

El cuestionario dirigido a gerencia y *stakeholders*, término que en este estudio designa a las partes interesadas en los sistemas desarrollados, (la Gerencia General, la Gerencia de Mantenimiento, la coordinación y supervisión del suministro y distribución de combustible, y los responsables de la recepción, distribución y control del suministro de combustible en Tromerca), contenía cuatro afirmaciones vinculadas con comprensión del estado del proyecto, reducción de la complejidad de revisión, mejora de los tiempos de respuesta y disposición a delegar decisiones técnicas. El cuestionario dirigido al equipo de TI abordó claridad de requerimientos, reducción del retrabajo, mejora de la comunicación y autonomía operativa. Las opciones fueron: totalmente de acuerdo, de acuerdo, neutral, en desacuerdo y totalmente en desacuerdo.

La muestra fue intencional y abarcó a actores directamente relacionados con los proyectos. Los tres integrantes del equipo de TI participaron en el desarrollo y los cinco *stakeholders* correspondieron a personal con funciones de decisión, supervisión o validación. Debido al tamaño de la muestra, los porcentajes se emplearon exclusivamente para describir la distribución de respuestas, limitando su alcance a un uso descriptivo y no inferencial.

La unidad de análisis estuvo constituida por la interacción entre el equipo de TI y los actores gerenciales involucrados en la toma de decisiones, supervisión y validación de los sistemas. El equipo estaba conformado por tres profesionales con funciones complementarias de desarrollo, diseño y contenidos. Durante el proceso, el grupo asumió una dinámica de autogestión interna y estableció un liderazgo operativo para coordinar tareas y canalizar la comunicación con la gerencia.

La recolección de información integró tres fuentes. La primera fue la observación participante, utilizada para registrar la dinámica de trabajo, los cambios en las interacciones,

los tiempos de respuesta y la evolución de la autonomía del equipo. La segunda fue la revisión documental de entregables, registros de validación, minutas y artefactos técnicos. La tercera fue un cuestionario estructurado de percepción con escala Likert de cinco niveles, aplicado al finalizar el proceso a ocho participantes: tres integrantes del equipo de TI y cinco representantes de gerencia y *stakeholders*.

El instrumento se construyó mediante la operacionalización de las dimensiones de confianza utilizadas en el estudio. El modelo articula los planteamientos de Mayer et al. (1995), quienes conciben la confianza organizacional a partir de percepciones de habilidad, integridad y benevolencia, y la distinción de McAllister (1995) entre confianza basada en cognición y confianza basada en afecto. A partir de estos referentes, el estudio operacionalizó cinco dimensiones: confianza cognitiva, asociada con la comprensión y competencia percibida; confianza técnica, relacionada con la calidad de los entregables; confianza operativa, vinculada con el cumplimiento progresivo; confianza relacional, asociada con la comunicación; y confianza interna, relacionada con la capacidad de autoorganización del equipo. Desde el marco teórico expuesto, las dimensiones cognitiva y técnica se corresponden con la habilidad percibida (Mayer et al., 1995) y con la confianza basada en la cognición (McAllister, 1995); la operativa, con la integridad, entendida como consistencia entre lo comprometido y lo entregado; la relacional, con la confianza interpersonal (Zaheer et al., 1998) y con la base afectiva descrita por McAllister (1995); y la interna, con una delegación que puede apoyarse en rutinas y mecanismos institucionales (Bachmann e Inkpen, 2011).

La escala permitió obtener evidencia descriptiva sobre cuatro dimensiones: transparencia del proceso, cumplimiento de entregas, capacidad de respuesta y calidad de los entregables. La quinta dimensión, autonomía o confianza interna, se analizó mediante observación y evidencia documental debido a su naturaleza operativa. La finalidad del cuestionario consistió en contrastar patrones de percepción con la evidencia cualitativa, orientando el análisis hacia una caracterización descriptiva en lugar de un alcance inferencial.

Esta operacionalización permitió mantener una conexión entre teoría y evidencia sin asumir que las cinco dimensiones fueran categorías originales de los autores de referencia. La confianza cognitiva se vinculó con la comprensión del proyecto y la competencia percibida; la técnica, con la calidad y consistencia de los resultados; la operativa, con el cumplimiento progresivo y la predictibilidad; la relacional, con la calidad y rapidez de la interacción; y la interna, con la autoorganización. La Tabla 1 resume esta articulación.

Tabla 1: Dimensiones de confianza operacionalizadas en el estudio

Dimensión	Definición operacional en el estudio	Evidencia principal
Cognitiva	Comprensión del estado del proyecto y competencia percibida.	Claridad de la información, menor necesidad de aclaratorias.
Técnica	Percepción de calidad y consistencia de los entregables.	Menor retrabajo y menor cantidad de observaciones estructurales.
Operativa	Cumplimiento progresivo y predictibilidad de las entregas.	Validación de avances parciales y continuidad del trabajo.
Relacional	Calidad, frecuencia y rapidez de la interacción.	Reducción de tiempos de respuesta y comunicación directa.
Interna	Capacidad del equipo para coordinar y gestionar autónomamente su ejecución.	Menor intervención gerencial y liderazgo operativo del equipo.

Fuente: Elaboración propia (2026), a partir de Mayer et al. (1995) y McAllister (1995).

Dado que el retrabajo constituye una variable clave del análisis, se definió operacionalmente como el esfuerzo adicional destinado a corregir, rehacer o reabrir componentes que ya habían sido entregados o integrados, como consecuencia de observaciones estructurales, errores o cambios de requerimientos detectados de forma tardía. Esta definición es coherente con el planteamiento de que los defectos identificados en etapas avanzadas del desarrollo incrementan el costo de su corrección (Pressman y Maxim, 2020). En el estudio, el retrabajo se observó mediante tres indicadores: la cantidad de observaciones estructurales registradas en las validaciones, la reapertura de componentes ya integrados documentada en minutas y registros de validación, y la percepción del equipo sobre su reducción (ítem dos del cuestionario dirigido al equipo de TI, Tabla 2).

La triangulación fue particularmente relevante porque la unidad de investigación tenía participación directa en el contexto estudiado. La comparación entre fuentes permitió evitar que una única percepción explicara por sí sola el fenómeno. Cuando una conducta observada coincidía con una respuesta del cuestionario y con evidencia documental, se consideró que existía convergencia suficiente para incorporarla al análisis. Cuando la información no permitía establecer una relación clara, se mantuvo la interpretación en un nivel descriptivo.

El estudio presenta cuatro limitaciones principales. Primero, corresponde a un único caso, por lo que sus resultados no pueden generalizarse directamente a todo el sector público venezolano. Segundo, la muestra se limitó al equipo de TI y a la gerencia vinculada al proyecto, sin incorporar usuarios finales ni otras áreas organizacionales. Tercero, el cuestionario se aplicó en un único momento, por lo que no permite medir longitudinalmente la evolución de las percepciones. Finalmente, la condición de participación directa de la unidad de

investigación en el contexto estudiado puede introducir sesgos interpretativos, mitigados mediante triangulación, pero no eliminados por completo. Asimismo, la concentración de todas las respuestas en los valores 4 y 5 podría reflejar un efecto techo o un sesgo de deseabilidad social, dado que los participantes conocían la vinculación de la unidad de investigación con el equipo; por ello, la evidencia del cuestionario se interpretó solo en convergencia con la observación y los documentos.

Además de estas limitaciones, debe considerarse que el proyecto de Averías continuaba en desarrollo al momento del análisis. Por ello, los hallazgos se refieren a la evolución de las dinámicas de trabajo observadas y no constituyen una evaluación definitiva del desempeño final del sistema.

En cuanto al uso de inteligencia artificial, las Figuras 2 y 3 fueron elaboradas con apoyo de Gemini (Google, 2026) y la Figura 1, con apoyo de Claude (Anthropic, 2026), a partir de contenidos y estructuras definidos en la investigación. Asimismo, Claude (Anthropic, 2026) se utilizó como apoyo en la revisión de la redacción y en la incorporación de las observaciones del arbitraje. Todos los contenidos, datos e interpretaciones fueron revisados y validados por la autoría, que asume plena responsabilidad por ellos.

Resultados

El análisis permitió identificar una secuencia de cambios entre el proyecto de Control de Gasoil y el posterior Sistema de Control de Unidades y Averías. En el primer proyecto, el equipo inició bajo un esquema de entregas integrales y validación posterior. La limitada visibilidad del proceso hacía que la gerencia dependiera de revisiones extensas y que el equipo enfrentara periodos prolongados de espera entre ciclos de trabajo. La situación puede interpretarse como una dinámica de "caja negra": la gerencia recibía principalmente el resultado final, mientras que las decisiones y dificultades del proceso permanecían poco visibles.

En esta etapa, la supervisión respondía a una lógica comprensible: ante la ausencia de evidencia suficiente sobre la capacidad del equipo, la gerencia requería mayor control. Sin embargo, el mismo mecanismo que buscaba reducir el riesgo podía generar más demora. Las revisiones posteriores implicaban analizar entregables densos y, cuando aparecían cambios, el equipo debía reabrir componentes que ya estaban integrados. La espera de aprobación interrumpía la continuidad del desarrollo.

La fragmentación produjo un cambio cualitativo en la unidad de validación. En lugar de que la gerencia evaluara el sistema únicamente como producto integral, comenzó a revisar componentes funcionales. Esta modificación hizo posible que los ajustes ocurrieran antes de que las decisiones quedaran incorporadas en una solución más compleja. El equipo, a su vez, recibió información sobre la dirección del proyecto con mayor anticipación.

La adaptación del lenguaje técnico complementó la fragmentación. El equipo incorporó un glosario de términos y simplificó la presentación de los avances. El objetivo consistió en organizar la información técnica en función de las decisiones gerenciales requeridas, conservando el rigor conceptual. La disminución de solicitudes de aclaratoria observada durante las revisiones se interpretó como evidencia de una mejora en la comprensión compartida del proyecto.

La validación interna también modificó la distribución de responsabilidades. Antes de cada entrega, el equipo revisaba la coherencia del resultado para reducir errores que pudieran llegar a la instancia gerencial. Conforme esta práctica se consolidó, las observaciones de la gerencia tendieron a concentrarse en aspectos funcionales y no en correcciones estructurales. El cambio sugiere que la confianza técnica se fortaleció a partir de la consistencia del desempeño observable.

La evolución puede resumirse como un desplazamiento de la intervención hacia la coordinación. En el esquema inicial, la gerencia intervenía sobre decisiones técnicas y el seguimiento del trabajo. En el esquema posterior, el equipo asumía la organización interna y la gerencia concentraba su participación en la validación de resultados y en la definición de necesidades. Esta distinción es relevante porque muestra que la autonomía no fue producto de una autorización aislada, sino de una acumulación de evidencias.

La lectura conjunta de las evidencias permite identificar cinco mecanismos: hacer visible el avance, dividir el trabajo, traducir la complejidad, responder con rapidez y asumir responsabilidad sobre la calidad. Cada mecanismo se relacionó con una dimensión de confianza. La combinación de estos mecanismos explica la evolución desde el control posterior hacia una regulación más distribuida.

Tabla 2: Cuestionario de percepción dirigido al equipo de TI

Dimensión evaluada	**Ítem/ afirmación**
Transparencia del proceso	La presentación de avances continuos ha generado mayor claridad en los requerimientos y expectativas de la gerencia.
Cumplimiento de entregas	El esquema de entregas incrementales ha contribuido a una reducción directa del retrabajo y de las correcciones estructurales.
Capacidad de respuesta	Se ha experimentado una mejora notable en la inmediatez y fluidez de la comunicación operativa con la gerencia.
Autonomía del equipo	Como equipo, se ha experimentado un incremento real en la autonomía operativa para gestionar la dinámica interna del trabajo.

Nota. Escala Likert de cinco niveles.

Fuente: Elaboración propia (2026).

La Tabla 2 presenta el cuestionario aplicado al equipo de TI y la Tabla 3 el correspondiente a gerencia y *stakeholders*. Ambos instrumentos fueron construidos específicamente para el caso y, por ello, se emplean como evidencia de percepción complementaria y no como una escala psicométrica validada para medición general de confianza organizacional.

Tabla 3: Cuestionario de percepción dirigido a gerencia y *stakeholders*

Dimensión evaluada	Ítem/ afirmación
Transparencia del proceso	La visualización continua de los avances ha facilitado significativamente la comprensión sobre el estado real del proyecto.
Cumplimiento de entregas	La fragmentación de los entregables ha reducido la complejidad del proceso de revisión y validación técnica.
Capacidad de respuesta	Se ha percibido una mejora notable en los tiempos de respuesta del equipo ante solicitudes, ajustes o requerimientos emergentes.
Autonomía del equipo	El desempeño del equipo ha generado mayor disposición a delegar decisiones técnicas de manera directa.

Nota. Escala Likert de cinco niveles.

Fuente: Elaboración propia (2026).

La Figura 2 sintetiza conceptualmente la transición observada. En la dinámica de caja negra, los requerimientos ingresan al proceso y la gerencia recibe principalmente el producto final. En la caja transparente, la confianza se relaciona con la posibilidad de observar entregas parciales, recibir retroalimentación y ampliar gradualmente la delegación.

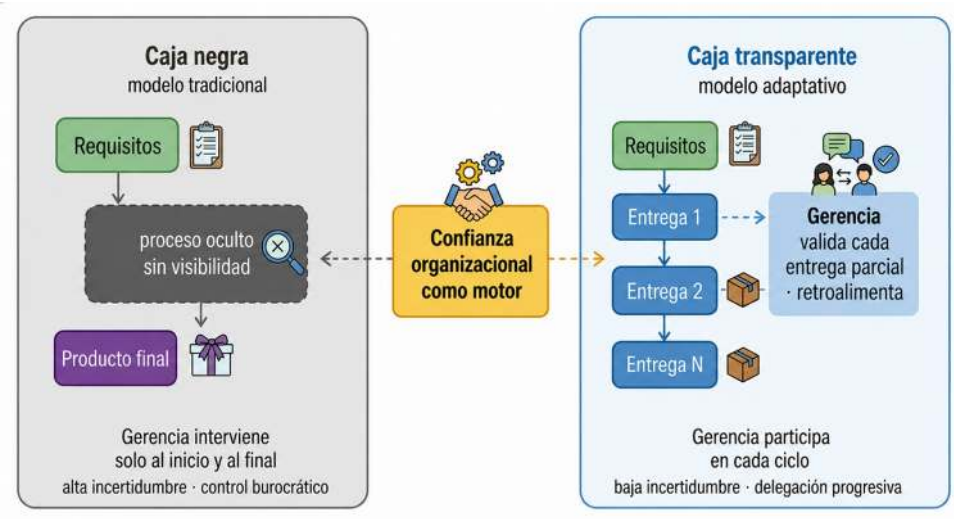


Figura 2: Modelo de caja negra y caja transparente.
Fuente: Elaboración propia (2026), basada en Pressman y Maxim (2020) y PMI (2021). Imagen generada con Gemini (Google, 2026), a partir de contenidos definidos en la investigación.

La Figura 3 representa la evolución cualitativa de los tiempos de respuesta registrada durante el proceso: de ciclos prolongados a interacciones que podían resolverse en horas en las fases de mayor consolidación. La comunicación también se modificó. Las interacciones dejaron de concentrarse exclusivamente en reuniones extensas y pasaron a incorporar canales directos y mensajes breves, con respuestas más frecuentes. La observación del proceso mostró una reducción progresiva de los tiempos de retroalimentación: de ciclos de revisión prolongados a respuestas que podían producirse en periodos mucho más cortos. Esta reducción disminuyó los tiempos de espera y permitió mantener la continuidad de las actividades. El cambio no se limitó a la relación con la gerencia. Internamente, el equipo mejoró la coordinación de tareas y concentró la comunicación externa a través de un liderazgo operativo.

La gerencia comenzó a dirigir requerimientos al líder del equipo, mientras disminuía la intervención directa sobre la organización interna del trabajo. Esta conducta constituye una evidencia observable de transferencia progresiva de responsabilidad. Durante el desarrollo posterior del Sistema de Control de Unidades y Averías, las condiciones construidas previamente se tradujeron en una dinámica de trabajo más adaptativa. El proyecto incorporó ciclos más cortos, validaciones continuas y una interacción más frecuente con los *stakeholders*. Esta modalidad constituyó una adopción contextual de prácticas compatibles con enfoques ágiles, especialmente la entrega incremental, la retroalimentación frecuente y la adaptación de requerimientos, en lugar de la implantación formal de Scrum u otro marco específico (Tablas 4 y 5).

Tabla 4: Distribución de respuestas del cuestionario: gerencia y *stakeholders* (n = 5)

Dimensión	Ítem/ variable	TA(5)	DA(4)	N(3)	ED(2)	TD(1)
Transparencia	1. Comprensión del estado del proyecto	4	1	0	0	0
Cumplimiento	2. Reducción en complejidad de revisión	3	2	0	0	0
Capacidad de respuesta	3. Tiempos de respuesta ante ajustes	4	1	0	0	0
Autonomía	4. Disposición a delegar decisiones	3	2	0	0	0

Nota. TA = totalmente de acuerdo; DA = de acuerdo; N = neutral; ED = en desacuerdo; TD = totalmente en desacuerdo.

Fuente: Elaboración propia (2026).

Tabla 5: Distribución de respuestas del cuestionario: equipo de TI (n = 3)

Dimensión	Ítem / variable	TA (5)	DA (4)	N (3)	ED (2)	TD (1)
Transparencia	1. Claridad en requerimientos	2	1	0	0	0
Cumplimiento	2. Reducción del retrabajo	2	1	0	0	0
Capacidad de respuesta	3. Mejora en la comunicación	3	0	0	0	0
Autonomía	4. Incremento en autonomía operativa	3	0	0	0	0

Nota. TA = totalmente de acuerdo; DA = de acuerdo; N = neutral; ED = en desacuerdo; TD = totalmente en desacuerdo.

Fuente: Elaboración propia (2026).

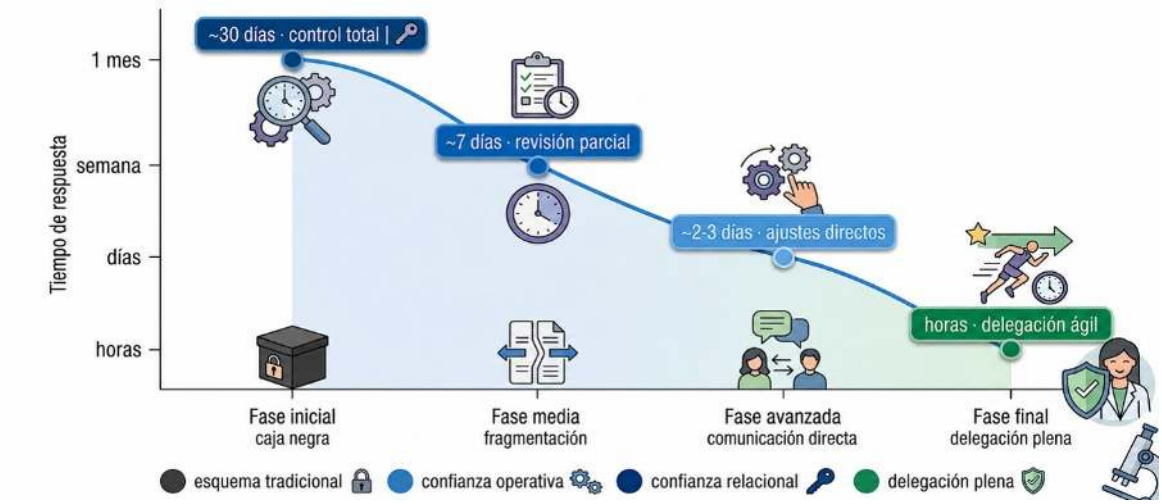


Figura 3: Evolución cualitativa del tiempo de respuesta y la delegación.
Fuente: Elaboración propia (2026), a partir de la observación participante. Imagen generada con Gemini (Google, 2026), a partir de los registros de la observación participante.

Discusión

Los resultados permiten interpretar la confianza como un fenómeno emergente construido mediante desempeño observable. Al inicio, la falta de experiencia compartida entre una gerencia acostumbrada al control y un equipo de TI recientemente conformado favorecía la supervisión detallada. En lugar de intentar eliminar directamente estos mecanismos, el equipo generó evidencia que permitió modificar gradualmente la percepción de riesgo. Esta secuencia coincide con la idea de que la confianza depende de percepciones sobre la capacidad y la conducta del otro (Mayer et al., 1995), pero añade una dimensión operativa: en proyectos de TI, la confianza puede materializarse en prácticas que hacen verificable el desempeño.

La transparencia fue el primer mecanismo relevante. La fragmentación de los entregables convirtió el proceso de desarrollo en una sucesión de resultados parciales observables. Para la gerencia, esto redujo la incertidumbre; para el equipo, permitió recibir retroalimentación antes de acumular trabajo. Por tanto, la visibilidad debe entenderse como una forma de reducir la asimetría de información entre quienes desarrollan y quienes supervisan. En términos del caso, este cambio representa el paso de una "caja negra" hacia una "caja transparente".

La segunda condición fue la consistencia. La validación interna antes de cada entrega redujo observaciones estructurales y aumentó la previsibilidad de los resultados. El equipo dejó de depender de la revisión gerencial como mecanismo principal de aseguramiento de calidad y comenzó a asumir responsabilidad sobre la calidad previa a la entrega. Esta práctica contribuyó a la confianza técnica y permitió que la gerencia desplazara su atención desde la

corrección detallada hacia la validación funcional.

La tercera condición fue la capacidad de respuesta. Los resultados del cuestionario (Tablas 4 y 5) muestran una valoración favorable de la mejora en los tiempos de interacción. En el grupo de gerencia y *stakeholders*, cuatro de cinco participantes se ubicaron en el nivel "totalmente de acuerdo" respecto a la mejora de los tiempos de respuesta, mientras que uno se ubicó en "de acuerdo". En el equipo de TI, los tres integrantes reportaron la máxima valoración respecto a la mejora de la comunicación. La coincidencia entre percepción y observación refuerza la interpretación de que la comunicación directa funcionó como mecanismo de construcción de confianza relacional.

La cuarta condición fue la autonomía. Los tres integrantes del equipo de TI señalaron el nivel máximo de acuerdo respecto al incremento de su autonomía operativa. En la gerencia, tres de cinco participantes señalaron estar totalmente de acuerdo y dos de acuerdo con una mayor disposición a delegar decisiones técnicas. La distribución muestra que la delegación fue favorable, pero no completamente estabilizada desde la perspectiva gerencial. Esto es coherente con una concepción progresiva de la confianza, dado que la autonomía se amplía a medida que se acumulan evidencias de desempeño.

Estos resultados complementan los antecedentes que describen dificultades de adopción ágil en el sector público. Vacari y Prikladnicki (2015), identifican barreras relacionadas con las características institucionales del sector, mientras que Nuottila et al. (2016), muestran la importancia de la comunicación y la confianza en la adopción de prácticas ágiles en organizaciones públicas. El caso analizado aporta una secuencia concreta: la agilidad emerge después de que el equipo demuestra capacidad, hace visible el proceso, mejora la comunicación y consolida mecanismos internos de calidad.

La evidencia reciente permite matizar y ampliar esta lectura. Baxter et al. (2023), al analizar un programa de TI del sector público británico, encontraron que la adopción ágil convive con tensiones no resueltas en torno a la aprobación de proyectos, las políticas, la gobernanza y la cultura organizacional; de manera similar, en Tromerca la agilidad se acomodó a los mecanismos formales. Hegele y Stoll (2024), con base en una encuesta a funcionarios de Austria, Alemania y Suiza, muestran que el liderazgo político y gerencial resulta esencial para avanzar hacia formas ágiles de gobierno, lo que coincide con el papel que desempeñó la disposición gerencial a delegar en el caso analizado. Por su parte, Tai y Awasthi (2025), advierten que la agilidad gubernamental tiende a ajustarse a los sistemas burocráticos existentes, lo cual es consistente con la adopción contextual y parcial de prácticas observada, más que con la implantación integral de un marco.

En el contexto latinoamericano, Pinto y Leme (2024), en un estudio de caso sobre la aplicación de Scrum en el desarrollo de sistemas de una organización pública brasileña,

identificaron barreras asociadas a la comprensión del negocio y del producto, así como prácticas deficientes que redujeron la calidad y el valor de las entregas y llevaron a percibir Scrum como ineficaz. El caso de Tromerca ofrece un contraste: la traducción de la complejidad técnica y la validación interna precedieron a la adopción de prácticas ágiles, lo que sugiere que la confianza cognitiva y técnica puede ser una condición previa para que estas prácticas sean percibidas como eficaces.

Asimismo, la distinción de Haug et al. (2024) entre cambios incrementales y transformadores permite ubicar el caso en el primer tipo, pues la transformación se produjo en las prácticas de una unidad de trabajo y en sus flujos de interacción con la gerencia. Los hallazgos coinciden, además, con Bachmann e Inkpen 2011, en que la confianza puede apoyarse en mecanismos institucionales. En este caso, los registros de validación y las entregas parciales verificables hicieron previsible el desempeño del equipo.

La relación entre confianza y control requiere, sin embargo, una precisión. Los hallazgos no permiten afirmar que la confianza elimine el control institucional ni que sustituya universalmente a los mecanismos burocráticos. Lo observado es más específico, dado que cuando el desempeño se vuelve visible y predecible, disminuye la necesidad de supervisión detallada en determinadas decisiones técnicas. El control se desplaza desde la revisión exhaustiva del proceso hacia la evaluación progresiva de resultados. En consecuencia, la confianza opera como un mecanismo complementario de regulación, en lugar de ser un sustituto absoluto de la institucionalidad.

A partir de esta interpretación se propone una hoja de ruta de cinco fases (Tabla 6). La primera corresponde a la validación de la capacidad técnica mediante resultados funcionales dentro del esquema existente. La segunda consiste en externalizar el proceso mediante entregas parciales verificables. La tercera busca reducir la carga cognitiva mediante la traducción de la complejidad técnica. La cuarta reconfigura la interacción mediante canales directos y ciclos de retroalimentación más cortos. La quinta consolida la delegación basada en confianza, cuando el equipo puede definir su dinámica de trabajo y responder por resultados sin requerir validación constante. El orden es importante porque cada fase disminuye una fuente de incertidumbre que condiciona la siguiente.

La secuencia puede expresarse como una cadena de habilitación: la visibilidad reduce la incertidumbre; la comprensión facilita la interacción; la interacción fortalece la relación; y la relación habilita la delegación. Este planteamiento no supone que todas las organizaciones deban reproducir exactamente las mismas prácticas, pero ofrece un marco para analizar qué evidencias deben acumularse antes de ampliar la autonomía de un equipo de TI en un entorno público.

En términos de gestión de proyectos, el aporte central del caso es desplazar la discusión desde

"cómo implementar una metodología ágil" hacia "qué condiciones permiten que las prácticas adaptativas sean aceptadas y sostenibles". Esta distinción es importante en organizaciones donde las estructuras formales no pueden modificarse rápidamente. La experiencia de Tromerca sugiere que una transformación progresiva puede comenzar en la unidad de trabajo, mediante prácticas compatibles con la normativa y orientadas a producir evidencia de valor, consistencia y capacidad de respuesta.

La caja transparente tampoco significa que toda la información del desarrollo deba estar permanentemente disponible para todos los actores. Lo relevante es la visibilidad selectiva de la información necesaria para decidir. En el caso, la fragmentación de entregables y la simplificación del lenguaje funcionaron como mecanismos de mediación entre la complejidad técnica y las necesidades gerenciales.

Esta interpretación permite diferenciar confianza técnica de confianza cognitiva. La primera depende principalmente de la calidad de los resultados; la segunda de la capacidad de los actores para comprender lo que está ocurriendo. Un entregable técnicamente correcto puede seguir generando incertidumbre si no es comprensible para quien debe validarlo. Por ello, la calidad y la comunicación se refuerzan mutuamente.

La rapidez de respuesta debe interpretarse igualmente con cautela. Reducir el tiempo de respuesta no implica que todas las decisiones sean técnicamente simples ni que deban resolverse de inmediato. Lo relevante es que los canales utilizados permitan distinguir qué asuntos requieren una decisión gerencial y cuáles pueden ser resueltos por el equipo. La confianza, por tanto, también contribuye a delimitar responsabilidades.

Tabla 6: Hoja de ruta para la construcción progresiva de confianza en equipos de TI públicos

Fase	Propósito	Dimensión predominante	Indicador de consolidación
1. Validación de capacidad	Demostrar solvencia mediante resultados funcionales dentro del esquema existente.	Técnica y cognitiva	Asignación de nuevos proyectos con menor necesidad de validación previa.
2. Externalización del proceso	Hacer visible el desarrollo mediante entregas parciales verificables.	Operativa	Validación de componentes parciales y menor dependencia de revisiones integrales.
3. Mediación cognitiva	Traducirla complejidad técnica a información útil para la decisión.	Cognitiva	Menor número de aclaratorias y mayor rapidez en decisiones.
4. Reconfiguración de la interacción	Reducir fricción comunicacional y acortar ciclos de retroalimentación.	Relacional	Menores tiempos de respuesta y mayor frecuencia de interacción directa.
5. Delegación basada en confianza	Trasladar el foco hacia resultados y autonomía técnica.	Interna e institucional	Equipo define su dinámica de trabajo sin validación constante.

Fuente: Elaboración propia (2026), a partir de los hallazgos del estudio.

La propuesta resulta especialmente pertinente para organizaciones donde las modificaciones estructurales son lentas o requieren decisiones externas al equipo. En lugar de plantear una transformación institucional inmediata, el equipo puede actuar sobre las prácticas que controla directamente. Esto coincide con el enfoque del Centro Latinoamericano de Administración para el Desarrollo (CLAD, 2008) sobre aprendizaje institucional y mejora continua, aunque el presente caso aporta una secuencia específica vinculada con proyectos de TI.

Conclusiones

El estudio permite concluir que la confianza organizacional desempeñó un papel habilitador en la adopción de prácticas adaptativas dentro del equipo de TI de Tromerca. La evidencia analizada muestra que la confianza evolucionó de manera progresiva a lo largo del proceso, consolidándose mediante prácticas observables: la fragmentación de entregables, la transparencia del avance, la comunicación continua, la validación interna y la autoorganización.

La evidencia cuantitativa descriptiva respalda esta interpretación. En el grupo de cinco representantes de gerencia y *stakeholders*, las respuestas se concentraron exclusivamente en los valores 4 y 5 de la escala para los cuatro indicadores evaluados. En el equipo de TI, los tres participantes valoraron con el nivel máximo la mejora de la comunicación y la autonomía operativa. Estos datos no permiten generalización estadística, pero sí aportan convergencia con la observación y los documentos revisados.

La principal contribución consiste en operacionalizar la confianza para un contexto de gestión de proyectos de TI mediante cinco dimensiones interrelacionadas: cognitiva, técnica, operativa, relacional e interna. Estas dimensiones permitieron interpretar cambios concretos en la relación entre el equipo y la gerencia, así como explicar por qué la delegación de decisiones técnicas aumentó después de que se acumularon evidencias de desempeño.

El caso también permite caracterizar una transición de "caja negra" a "caja transparente". La diferencia se fundamenta en la modificación de la unidad de interacción entre el equipo y la gerencia, trascendiendo la mera entrega de volumen informativo. Los resultados parciales hicieron posible validar durante el proceso, reducir el retrabajo y responder con mayor rapidez. De esta manera, el control se mantuvo activo, reorientándose progresivamente hacia resultados observables.

La hoja de ruta propuesta constituye una derivación práctica del caso: validar capacidad, hacer visible el proceso, facilitar la comprensión, reducir la fricción comunicacional y, finalmente, delegar. Su utilidad debe entenderse como marco orientador y no como procedimiento universal, debido a las limitaciones propias del estudio de caso único.

Como líneas futuras, se plantea replicar el modelo en otras organizaciones públicas,

incorporar usuarios finales y otras áreas institucionales, desarrollar mediciones longitudinales y explorar la relación entre las dimensiones de confianza y variables cuantificables de desempeño, como tiempos de entrega, retrabajo, calidad y cumplimiento de objetivos.

En consecuencia, el alcance del caso se circunscribe a mostrar un mecanismo plausible y observable mediante el cual un equipo puede ganar margen de acción: demostrar capacidad, hacer visible el proceso, facilitar la comprensión, responder con mayor fluidez y asumir responsabilidad sobre los resultados, en lugar de considerarse una demostración de eficiencia automática aplicable a cualquier organización pública. Bajo estas condiciones, la confianza puede convertirse en un activo que habilita formas de trabajo más adaptativas a partir de la dinámica del equipo, sin requerir una reforma estructural previa.

Referencias

Anthropic. (2026). *Claude* [Modelo de lenguaje de gran tamaño]. https://claude.ai

Bachmann, R. e Inkpen, A. (2011). Understanding institutional-based trust building processes in inter-organizational relationships. *Organization Studies*, *32*(2), 281-301. https://doi.org/10.1177/0170840610397477

Baxter, D., Dacre, N., Dong, H., y Ceylan, S. (2023). Institutional challenges in agile adoption: Evidence from a public sector IT project. *Government Information Quarterly*, *40*(4), Artículo 101858. https://doi.org/10.1016/j.giq.2023.101858

Google. (2026). *Gemini* [Modelo de lenguaje de gran tamaño]. https://gemini.google.com

Haug, N., Dan, S., y Mergel, I. (2024). Digitally-induced change in the public sector: A systematic review and research agenda. *Public Management Review*, *26*(7), 1963-1987. https://doi.org/10.1080/14719037.2023.2234917

Hegele, Y., y Stoll, A. (2024). What drives the adoption of agile government? Insights from Austria, Germany, and Switzerland. *Information Polity*, *29*(2), 137-152. https://doi.org/10.3233/IP-230055

Huamán, P., y Medina, C. (2022). Transformación digital en la administración pública: desafíos para una gobernanza activa en el Perú. *Comuni@cción*, *13*(2), 93-105. https://doi.org/10.33595/2226-1478.13.2.594

Mayer, R., Davis, J., y Schoorman, F. (1995). An integrative model of organizational trust. *The Academy of Management Review*, *20*(3), 709-734. https://doi.org/10.2307/258792

McAllister, D. (1995). Affect- and cognition-based trust as foundations for interpersonal cooperation in organizations. *Academy of Management Journal*, *38*(1), 24-59. https://doi.org/10.2307/256727

Mergel, I., Ganapati, S., y Whitford, A. (2021). Agile: A new way of governing. *Public Administration Review*, *81*(1), 161-165. https://doi.org/10.1111/puar.13202

Nuottila, J., Aaltonen, K., y Kujala, J. (2016). Challenges of adopting agile methods in a public organization. *International Journal of Information Systems and Project Management*, *4*(3), 65-85. https://doi.org/10.12821/ijispm040304

Pinto, J., y Leme, R. (2024). Analysis of project management principles with the Scrum framework in systems development: A case study in a public organization. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, *21*(2), Artículo 1878. https://doi.org/10.14488/BJOPM.1878.2024

PMI. (2021). *Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía del PMBOK) y estándar para la dirección de proyectos (7.ª ed.)* Project Management Institute.

Pressman, R., y Maxim, B. (2020). *Software engineering: A practitioner's approach (9th ed.)* McGraw-Hill Education.

Schwaber, K., y Sutherland, J. (2020). *The Scrum guide: The definitive guide to Scrum: The rules of the game*. Scrum.org. https://scrumguides.org/scrum-guide.html

Tai, K., y Awasthi, P. (2025). An exploration of agile government in the public sector: A systematic literature review at macro, meso, and micro levels of analysis. *Government Information Quarterly*, *42*(4), Artículo 102082. https://doi.org/10.1016/j.giq.2025.102082

Tyagi, S., Sibal, R., y Suri, B. (2022). Empirically developed framework for building trust in distributed agile teams. *Information and Software Technology*, *145*, Artículo 106828. https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.106828

Vacari, I., y Prikladnicki, R. (2015). Adopting agile methods in the public sector: A systematic literature review. *Proceedings of the 27th International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering. KSI Research*, pp. 249-254.

Zaheer, A., McEvily, B., y Perrone, V. (1998). Does trust matter? Exploring the effects of interorganizational and interpersonal trust on performance. *Organization Science*, *9*(2), 141-159. https://doi.org/10.1287/orsc.9.2.141

Ensayos sobre la Creación de Conocimiento



Estrategias en nanomedicina para el uso de especies reactivas de oxígeno

Estratégias em nanomedicina para o uso de espécies reativas de oxigênio

Strategies in nanomedicine for the use of reactive oxygen species

Franklin Vargas [1]
Miguel León [2]
Johany Velásquez [3]
Alexis Maldonado [4]
Mariangel Contreras [5]
Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Miranda, Venezuela[1,2,3]
Centro de Química Dr. Gabriel Chuchani, Distrito Capital, Venezuela[4]
Universidad Metropolitana, Distrito Capital, Venezuela[5]
vargas2212@gmail.com[1]
miguel.italia11@gmail.com[2]
johanylissetteivic@gmail.com[3]
alemaldon@gmail.com[4]
mariangeln.contreras@gmail.com[5]

Fecha de recepción: 08/06/2026
Fecha de aceptación: 28/09/2026
Pág: 114 – 124
DOI: 10.5281/zenodo.23888256

Resumen

En este trabajo se realizó una revisión bibliográfica de 16 artículos indexados de los últimos cinco años, centrada en las estrategias para mejorar la generación de especies reactivas del oxígeno (ERO) en nanomedicina. Las ERO constituyen una herramienta prometedora en este campo, ofreciendo múltiples posibilidades terapéuticas, tales como la eliminación selectiva de tumores mediante procesos oxidativos, la liberación controlada de fármacos en respuesta a estímulos redox y la protección antioxidante en enfermedades inflamatorias y neurodegenerativas.

Esta obra está bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0.

Se enfatiza la importancia de realizar mediciones precisas y exhaustivas de las ERO, realizar validaciones cruzadas y diseñar estrategias adecuadas de biodistribución. Las ERO pueden provocar efectos adversos, como citotoxicidad en tejidos no diana, disfunción inmunitaria y acumulación prolongada de nanopartículas en el organismo. Se proponen estrategias para la reducción de riesgos desde la fase de diseño, coadministración con antioxidantes, uso de catalizadores autolimitados aminorando su actividad tras cumplir su función, desarrollo de materiales biodegradables removibles a través de la orina, minimizándose así la toxicidad sistémica asociada. Este análisis propone un marco seguro para el diseño de nanoplataformas destinadas a regular las especies reactivas del oxígeno. Se destaca la importancia de una activación específica y controlada, empleando estímulos internos y externos, garantizándose una regulación espacio-temporal precisa. Se resalta la modulación catalítica para minimizar el riesgo de estrés oxidativo excesivo. Modalidades emergentes como las terapias fotodinámicas, quimiodinámica y sonodinámica, y sistemas basados en nanoenzimas son examinadas. Estos enfoques han resultado efectivos tanto para eliminar ERO como para adaptarse a las condiciones redox del entorno.

Palabras clave: especies reactivas de oxígeno (ERO), nanoenzimas, nanomedicina, nanotransportadores, terapia fotodinámica.

Resumo

Neste trabalho, realizou-se uma revisão bibliográfica de 16 artigos indexados dos últimos cinco anos, com foco nas estratégias para aprimorar a geração de espécies reativas de oxigênio (ERO) na nanomedicina. As ERO constituem uma ferramenta promissora nesta área, oferecendo múltiplas possibilidades terapêuticas, tais como a eliminação seletiva de tumores por meio de processos oxidativos, a liberação controlada de fármacos em resposta a estímulos redox e a proteção antioxidante em doenças inflamatórias e neurodegenerativas. Enfatiza-se a importância de realizar medições precisas e exaustivas das ERO, efetuar validações cruzadas e projetar estratégias adequadas de biodistribuição. As ERO podem provocar efeitos adversos, como citotoxicidade em tecidos não alvo, disfunção imunológica e acúmulo prolongado de nanopartículas no organismo. Propõem-se estratégias para a redução de riscos desde a fase de projeto, incluindo a coadministração com antioxidantes, o uso de catalisadores autolimitados (que reduzem sua atividade após cumprirem sua função) e o desenvolvimento de materiais biodegradáveis eliminávels pela urina, minimizando assim a toxicidade sistêmica associada. Esta análise propõe uma estrutura segura para o projeto de nanoplataformas destinadas a regular as espécies reativas de oxigênio. Destaca-se a importância de uma ativação específica

e controlada, empregando estímulos internos e externos, garantindo uma regulação espaço-temporal precisa. Ressalta-se a modulação catalítica para minimizar o risco de estresse oxidativo excessivo. São examinadas modalidades emergentes, como as terapias fotodinâmica, quimiodinâmica e sonodinâmica, bem como sistemas baseados em nanoenzimas. Essas abordagens têm se mostrado eficazes tanto para eliminar ERO quanto para se adaptar às condições redox do ambiente.

Palavras-chave: espécies reativas de oxigênio (ERO), nanoenzimas, nanomedicina, nanotransportadores, terapia fotodinâmica.

Abstract

This study presents a literature review of 16 indexed articles published over the last five years, focusing on strategies to enhance the generation of reactive oxygen species (ROS) in nanomedicine. ROS represent a promising tool in this field, offering diverse therapeutic possibilities such as the selective elimination of tumors via oxidative processes, controlled drug release in response to redox stimuli, and antioxidant protection in inflammatory and neurodegenerative diseases. The study emphasizes the importance of accurate and comprehensive ROS measurement, cross-validation, and the design of appropriate biodistribution strategies. ROS can induce adverse effects, including cytotoxicity in non-target tissues, immune dysfunction, and prolonged nanoparticle accumulation in the body. Risk-reduction strategies are proposed, ranging from the initial design phase to co-administration with antioxidants, the use of self-limiting catalysts that reduce activity after performing their function, and the development of biodegradable materials excretable via urine, thereby minimizing associated systemic toxicity. This analysis proposes a safe framework for designing nanoplatforms intended to regulate reactive oxygen species. It highlights the importance of specific, controlled activation using internal and external stimuli to ensure precise spatiotemporal regulation. Catalytic modulation is underscored as a means to minimize the risk of excessive oxidative stress. Emerging modalities—such as photodynamic, chemodynamic, and sonodynamic therapies, as well as nanoenzyme-based systems—are examined. These approaches have proven effective both for eliminating ROS and for adapting to the redox conditions of the surrounding environment.

Key words: reactive oxygen species (ROS), nanoenzymes, nanomedicine, nanocarriers, photodynamic therapy.

Introducción

Las especies reactivas de oxígeno (ERO), que incluyen el anión superóxido ($O_2\cdot^-$), el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), el radical hidroxilo($\cdot OH$) y el oxígeno singlete ($^1O_2$), ejercen una función dual en los sistemas biológicos: actúan como intermediarios de señalización indispensables y, simultáneamente, como mediadores patológicos del daño oxidativo (Yang et al., 2019). La promesa terapéutica de la nanomedicina basada en ERO se ve condicionada por factores críticos de seguridad, tales como la citotoxicidad oxidativa inespecífica (fuera de diana), la inmunomodulación no deseada, la bioacumulación de nanopartículas y una cinética de eliminación ambigua. Los avances recientes en arquitecturas nanomédicas generadoras de ERO han buscado explotar esta paradoja mediante reacciones oxidativas controladas para eliminar células malignas o, por el contrario, mediante el empleo de nanoenzimas antioxidantes para atenuar el estrés oxidativo en afecciones como la isquemia cerebral, la inflamación crónica y diversos trastornos neurodegenerativos (Liu et al., 2020; Mohite et al., 2025; Wang et al., 2023).

Este trabajo describe un marco de diseño integral para la ingeniería de nanoterapias moduladoras de ERO que armonizan la eficacia con la bioseguridad (Nash y Ahmed, 2015), integrando principios de despliegue selectivo, cinética catalítica controlada, biodegradabilidad y cumplimiento de protocolos de cuantificación. Dichos principios derivan de directrices de consenso internacional y revisiones académicas contemporáneas (Singh et al., 2025). Mientras que, en concentraciones homeostáticas, las ERO orquestan complejas cascadas de señalización intracelular, su exceso provoca perturbaciones oxidativas perjudiciales en las biomacromoléculas (Samrot et al., 2022).

Paradigmas de seguridad fundamentales para nanotransportadores moduladores de ERO

Las distintas especies reactivas de oxígeno presentan reactividades fisicoquímicas, capacidades de difusión y penetración celular divergentes. Los radicales hidroxilos ($\cdot OH$), si bien son excepcionalmente reactivos, no son selectivos y conllevan un riesgo considerable de daño colateral. El peróxido de hidrógeno, por el contrario, posee mayor difusibilidad y facilita los efectos moduladores sobre las vías de señalización sensibles al redox. Por ello, una estrategia de nanotransportadores orientada a la seguridad implica la selección juiciosa del tipo de ERO congruente con el contexto patológico: el uso de ERO de alta reactividad y corto alcance para una acción tumoral localizada, o el empleo de estrategias de eliminación selectiva para intervenciones neuroprotectoras o antiinflamatorias. En este sentido, el oxígeno singlete ($^1O_2$), utilizado en la terapia fotodinámica (TFD), se beneficia de un radio de propagación espacial limitado, lo que le confiere una localización intrínseca (Li et al., 2025).

Por su parte, la generación inducida de ERO constituye una medida de seguridad fundamental. Los diseños de doble activación combinan ligandos de focalización convergentes

con módulos sensibles al microambiente para confinar las explosiones de ERO exclusivamente a las zonas afectadas, optimizando así la ventana terapéutica y minimizando el daño oxidativo (Li et al., 2025; Liu et al., 2020). Para esto, se emplean indicadores bioquímicos endógenos acordes con la patología -como un microambiente ácido, enzimas anormalmente elevadas o niveles altos de H_2O_2-. Asimismo, deben considerarse los estímulos exógenos, tales como la irradiación fotónica (TFD), la activación acústica (terapia sonodinámica) o la radiación ionizante, los cuales proporcionan una precisión submilimétrica en la liberación de ERO (León y Vargas, 2022; Vargas, Lucena et al., 2023; Yang et al., 2019).

Adicionalmente, la regulación de la cinética de las ERO mediante modulación catalítica es un proceso fundamental. Las nanoterapias catalíticas que incluyen la terapia quimiodinámica (TQ) de tipo Fenton (o análogas) y la catálisis nanoenzimática requieren un control cinético riguroso para prevenir la sobreproducción de ERO. Entre las estrategias principales se encuentran: la modulación de la densidad de carga catalítica y de la topología superficial de las nanopartículas (Yang et al., 2019); la incorporación de grupos catalíticos de "seguridad" que se autoinhiben al superar ciertos umbrales de ERO; el diseño de esquemas de reacción autolimitantes basados en el agotamiento del sustrato; y la distribución de antioxidantes junto con medidas protectoras. Además, es posible integrar interruptores de desactivación redox para efectuar una transición automática de un modo prooxidante a uno antioxidante cuando las concentraciones de ERO excedan los parámetros operativos seguros.

Finalmente, para disminuir las secuelas oxidativas indeseadas, se aconseja la incorporación de antioxidantes, tanto captadores moleculares como miméticos enzimáticos (como SOD o catalasa), dentro de los nanodominios con actividad de ERO (Koide et al., 2021; Singh et al., 2025; Vargas, León et al., 2023).

Biodegradabilidad y eliminación

En el caso de las estructuras intrínsecamente no degradables, como el óxido de cerio, resulta esencial realizar un seguimiento continuo de la biodistribución y la vigilancia de posibles toxicidades crónicas a lo largo del tiempo. Los nanomateriales persistentes pueden implicar riesgos de estrés oxidativo e impacto inmunológico prolongado. Por esta razón, es crucial recurrir a matrices biodegradables, como poliésteres, andamios de óxido de hierro o estructuras ultracompactas que favorezcan la eliminación renal. La ingeniería del diseño de nanopartículas desempeña un papel clave al permitir una modulación controlada de las ERO. A continuación se brindan distintas estrategias para generar ERO:

- La terapia fotodinámica (TFD) utiliza nanotransportadores cargados con fotosensibilizadores que permiten inducir ERO de forma localizada y precisa mediante exposición a luz.
- La terapia quimiodinámica (TQD) emplea nanomateriales con actividad similar a

la reacción de Fenton para generar radicales hidroxilo en microambientes tumorales acidificados. En este enfoque, se busca mejorar la seguridad mediante la pasivación catalítica y la activación específica según el pH.

- Los métodos sonodinámicos y radiodinámicos aprovechan energía acústica o ionizante para garantizar una mayor penetración en los tejidos. Estas estrategias requieren un control riguroso, como calibrar la dosimetría energética, proteger zonas no objetivo y complementar con antioxidantes.

Para tratar tumores hipóxicos, los nanodispositivos pueden incorporar módulos generadores de oxígeno, como núcleos con actividad catalasa, evitando así la supresión de ERO por condiciones de hipoxia. Asimismo, las tecnologías basadas en catálisis nanoenzimática, que replican actividades peroxidasa u oxidasa, amplifican la producción de ERO, aunque requieren controles estrictos mediante pasivación superficial y disponibilidad de sustratos. En cuanto a las estrategias antioxidantes y eliminación de ERO, los sistemas sensibles a estos compuestos han mostrado ser eficaces. Los portadores poliméricos con grupos funcionales como tiocetal y boronato se desintegran en presencia de ERO, liberando agentes terapéuticos y generando productos inofensivos. Por otro lado, ciertos nanomateriales antioxidantes, como el óxido de cerio, el azul de Prusia o el óxido de manganeso, presentan características similares a las enzimas superóxido dismutasa (SOD) y catalasa, regulando la sobreproducción oxidativa. Sin embargo, se debe evitar la eliminación excesiva de radicales libres para no alterar la homeostasis redox propia del organismo.

Activación física

La radiación ionizante incrementa la generación de especies reactivas de oxígeno mediante procesos mediados por nanopartículas; sin embargo, es esencial equilibrar el estrés oxidativo sinérgico con los riesgos de radiotoxicidad. En cuanto a la terapia fotodinámica (TFD), la irradiación focalizada con fotones demanda una calibración dosimétrica precisa. Por otro lado, su combinación con ultrasonido terapéutico (UT) mejora la penetración en capas tisulares más profundas, aunque se debe reducir al máximo la posible cavitación adversa. En lo que respecta a la activación química y bioquímica sensible al pH, se recomienda utilizar compuestos inertes en condiciones de pH fisiológico que únicamente se activen en casos de acidosis patológica, evitando así su liberación en ambientes ácidos benignos. Asimismo, se pueden emplear recubrimientos sensibles a enzimas que permitan una acción más controlada.

La liberación activada por metaloproteinasas de matriz proporciona una inducción de ERO específica para la enfermedad. Además, los sistemas de activación autorregulada por ERO a través de constructos que ajustan su actividad de un estado prooxidante a uno antioxidante al detectar un nivel umbral ofrecen un enfoque dinámico y adaptativo para optimizar el tratamiento. La cuantificación y la regulación de las ERO son fundamentales para cumplir con los estándares normativos, minimizando la dependencia exclusiva de métodos como la

fluorescencia de DCFH-DA, dado que estos presentan limitaciones en términos de especificidad. Las recomendaciones establecidas apuntan a:

- Implementar ensayos complementarios para la detección de ERO, respaldados por controles enzimáticos que aseguren la veracidad de los resultados.
- Documentar y reportar detalladamente los parámetros experimentales clave, incluyendo niveles de oxigenación, composición sérica y condiciones de iluminación.
- Realizar un mapeo exhaustivo de la biodistribución in vivo, análisis de biomarcadores oxidativos y verificaciones histopatológicas que validen los hallazgos.
- Garantizar la transparencia total en los procedimientos y reportes para favorecer tanto la reproducibilidad científica como la conformidad con auditorías regulatorias.

Este enfoque integral permitirá abordar de forma rigurosa las limitaciones técnicas y potenciar la calidad de los estudios sobre ERO. Finalmente, la evaluación de la seguridad preclínica debe centrarse en la vigilancia específica de la histopatología oxidativa en órganos clave como el hígado, el bazo, los riñones, los pulmones y el cerebro (Makhdoumi et al., 2020). El ajuste de la dosis se realiza mediante biomarcadores, utilizando índices como la concentración de H_2O_2 y la carbonilación de proteínas para obtener mayor precisión. Además, se debe incluir un perfil inmunológico integral que contemple las redes de citocinas y la activación del sistema del complemento (Fadeel y Garcia, 2010; Lasala et al., 2025; Li et al., 2025).

Entre algunos ejemplos sobresalientes se encuentra la síntesis de nanoenzimas de MnO_2 para abordar el tratamiento de la lesión por isquemia-reperfusión, las cuales funcionan de forma análoga a la enzima catalasa. Estas nanoenzimas muestran una reducción selectiva de su actividad en condiciones redox fisiológicas, lo que evita interferencias con los procesos normales de señalización celular (Wang et al., 2023). Asimismo, destacan las nanoestructuras multimodales para la terapia fotodinámica (TFD), diseñadas con arquitecturas en capas que integran fotosensibilizadores, módulos para incrementar la oxigenación, activadores específicos asociados a patologías y mecanismos efectivos para mitigar el exceso de especies reactivas de oxígeno (ERO) (Singh et al., 2025; Yang et al., 2019).

En cuanto a los aspectos traslacionales y regulatorios, entre las consideraciones clave se encuentra la necesidad de una caracterización fisicoquímica exhaustiva que incluya un análisis detallado de contaminantes traza. Resulta fundamental aportar evidencia mecanicista concluyente que acredite la generación específica de ERO en el sitio de acción, garantizando un impacto sistémico mínimo. Además, se requiere la recopilación de datos farmacocinéticos y toxicológicos longitudinales, especialmente para sistemas no degradables. Por último, es imprescindible asegurar el cumplimiento de los estándares internacionales establecidos para la

cuantificación y medición de ERO.

Por otra parte, la estratificación de pacientes mediante biomarcadores redox facilita la personalización de intervenciones dirigidas a las ERO, optimizando así los márgenes de seguridad terapéutica. Respecto a la modulación mitocondrial de ERO, esta estrategia busca incrementar la selectividad tumoral, aunque su seguridad metabólica debe ser rigurosamente confirmada antes de una implementación clínica extensa.

Finalmente, los nanomateriales dinámicos sensibles a las ERO destacan por su capacidad de ajustar bidireccionalmente la generación y eliminación de estas moléculas, ofreciendo nuevas oportunidades terapéuticas (Tucker, 2026). Las técnicas avanzadas de imagen de ERO in vivo proporcionan un mapeo espaciotemporal preciso de los fenómenos oxidativos, facilitando su comprensión en tiempo real. Estos avances se sustentan en una combinación de análisis fundamentales y perspectivas de investigación futura (Buzea et al., 2007; Mohite et al., 2025).

Lista de verificación de seguridad

1. Realizar la caracterización integral de la nanopartícula, incluyendo tamaño, potencial zeta, composición, contenido de metales, estabilidad en suero, perfil de liberación y tasas catalíticas (kcat o recambio, según sea aplicable).

2. Cuantificar con precisión las especies reactivas de oxígeno. No confiar únicamente en una sola sonda, sino emplear ensayos complementarios para detectar ·OH, oxígeno singlete, H_2O_2 y superóxido. Adicionalmente, seguir los procedimientos operativos estándar establecidos para pruebas como DCFH-DA y otras sondas relevantes. La cuantificación de especies reactivas de oxígeno (ERO) mediante DCFH-DA (diacetato de 2',7'-diclorodihidrofluoresceína) es un ensayo colorimétrico/fluorimétrico rápido y económico utilizado para medir el estrés oxidativo celular. La intensidad de fluorescencia es directamente proporcional a la cantidad de ERO presentes.

3. Incorporar controles biológicos adecuados, como el pretratamiento con antioxidantes, la adición de catalasa/SOD y captadores de ERO, para confirmar los mecanismos involucrados.

4. Garantizar condiciones experimentales que simulen un entorno fisiológico realista, incluyendo cámaras hipóxicas, medios suplementados con suero y, siempre que sea posible, modelos tridimensionales o sistemas de organoides.

5. Evaluar la biodistribución y eliminación del nanomaterial: analizar la acumulación en hígado, bazo y riñón, así como su persistencia temporal con técnicas como ICP-MS para metales. Además, investigar los marcadores de daño oxidativo en órganos clave, tales como peroxidación lipídica, carbonilos proteicos y oxidación del ADN.

6. Llevar a cabo análisis de inmunotoxicidad e inflamación mediante la cuantificación de citocinas, evaluación de activación del complemento y estudios histopatológicos para identificar posibles daños por estrés oxidativo.

7. Conducir estudios a largo plazo en casos de nanomateriales persistentes. Estos deben abarcar toxicidad por dosis repetidas y evaluar aspectos como neurotoxicidad o efectos en la reproducción, según se considere necesario.

Conclusiones

El uso de especies reactivas de oxígeno (ERO) en nanomedicina ofrece una gran versatilidad terapéutica, abarcando desde la ablación tumoral selectiva hasta la citoprotección, pero exige un riguroso equilibrio entre eficacia y bioseguridad. La terapia fotodinámica destaca como la estrategia más madura gracias a su preciso control espaciotemporal en la generación de ERO, aunque requiere innovaciones, como la integración de módulos generadores de oxígeno, para superar su limitada penetración tisular y la hipoxia tumoral.

Para garantizar la seguridad del paciente y evitar la toxicidad sistémica, es imprescindible implementar una modulación catalítica de las ERO con sistemas autolimitantes e interruptores redox. Asimismo, resulta imperativo diseñar nanotransportadores biodegradables con eliminación renal eficiente, previniendo así la toxicidad crónica y el estrés oxidativo residual asociados a los nanomateriales no degradables. La viabilidad clínica de estas tecnologías también depende de una cuantificación precisa de las ERO, requiriendo baterías de ensayos analíticos complementarios para superar la falta de especificidad de los métodos tradicionales, como el DCFH-DA.

Aunque las modalidades emergentes, como las terapias sonodinámicas, radiodinámicas o las nanoenzimas, ofrecen ventajas como una mayor penetración tisular, también introducen nuevos retos dosimétricos. En definitiva, el éxito traslacional de estas plataformas nanomédicas radicará en la estricta adopción del paradigma de seguridad desde el diseño, sustentado en una caracterización fisicoquímica exhaustiva, evaluaciones toxicológicas longitudinales y metodologías transparentes que permitan desarrollar terapias seguras y clínicamente aplicables.

Referencias

Buzea, C., Pacheco, I., y Robbie, K. (2007). Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity. *Biointerphases*, *2*(4), 17-71. https://doi.org/10.1116/1.2815690

Fadeel, B., y Garcia, A. (2010). Better safe than sorry: Understanding the toxicological properties of inorganic nanoparticles manufactured for biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, *62*(3), 362-374. https://doi.org/10.1016/j.addr.2009.11.008

Koide, H., Okishima, A., Hoshino, Y., Kamon, Y., Yoshimatsu, K., Saito, K., Yamauchi, I., Ariizumi, S., Zhou, Y., Xiao, T., Goda, K., Oku, N., Asai, T., y Shea, K. (2021). Synthetic hydrogel nanoparticles for sepsis therapy. *Nat Commun*, *12*, 5552. https://doi.org/10.1038/s41467-021-25847-2

Lasala, P., Latronico, T., Mattia, U., Matteucci, R., Milella, A., Grattieri, M., Liuzzi, G., Petrosillo, G., Panniello, A., Depalo, N., Curri, M., y Fanizza, E. (2025). Enhancing Antioxidants Performance of Ceria Nanoparticles in Biological Environment via Surface Engineering with o-Quinone Functionalities. *Antioxidants*, *14*(8), 916. https://doi.org/10.3390/antiox14080916

León, M., y Vargas, F. (2022). Preliminary research on metalized phthalocyanines synthesis. Evaluation as potential photosensitizer in photodynamic therapy. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, *51*(1), 347-367. https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v51n1.102717

Li, Z., Lu, Y., Wang, L., Shi, L., y Wang, T. (2025). Reactive oxygen species-dependent nanomedicine therapeutic modalities for gastric cancer. *Nanoscale advances*, *7*(11), 3210-3227. https://doi.org/10.1039/D5NA00321K

Liu, J., Li, Y., Chen, S., Lin, L., Lai, H., Chen, B., y Chen, T. (2020). Biomedical application of ROS-responsive nanocarriers in cancer, inflammation, and neurodegenerative diseases. *Frontiers in Chemistry*, *8*, 838. https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00838

Makhdoumi, P., Karimi, H., y Khazaei, M. (2020). Review on Metal-Based Nanoparticles: Role of Reactive Oxygen Species in Renal Toxicity. *Chemical Research in Toxicology*, *33*(10), 2503-2514. https://doi.org/10.1021/acs.chemrestox.9b00438

Mohite, P., Puri, A., Munde, S., Ade, N., Budar, A., Singh, A., Datta, D., Mangmool, S., Singh, S., y Chittasupho, C. (2025). Bioactive Compound-Fortified Nanomedicine in the Modulation of Reactive Oxygen Species and Enhancement of the Wound Healing Process: A Review. *Pharmaceutics*, *17*(7), 855. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17070855

Nash, K., y Ahmed, S. (2015). Nanomedicine in the ROS-mediated pathophysiology: Applications and clinical advances. *Nanomedicine*, *11*(8), 2033-2040. https://doi.org/10.1016/j.nano.2015.07.003

Samrot, A., Ram, S., Deenadhayalan, R., Rajesh, V., Padmanaban, S., y Radhakrishnan, K. (2022). Nanoparticles, a double-edged sword with oxidant as well as antioxidant properties. A review. *Oxygen*, *2*(4), 591-604. https://doi.org/10.3390/oxygen2040039

Singh, P., Mishra, A., Pratap, R., Kumar, P., y Tripathi, M. (2025). Nanoformulation-based medicines for the treatment of reactive oxygen species-induced diseases: A review. *Nanofabrication*, *10*. https://doi.org/10.37819/nanofab.10.2055

Tucker, B. (2026). *Nanomedicina: guía del médico para el futuro de la asistencia sanitaria*. Sermo Team. https://www.sermo.com/es/resources/nanomedicina-guia-del-medico-para-el-futuro-de-la-asistencia-sanitaria/

Vargas, F., León, M., Herrera, M., Acevedo, E., y Jhon, V. (2023). Antioxidantes como compuestos quimiopreventivos del cáncer cutáneo. *Dermatol Venz*, *61*(2). https://doi.org/10.70181/DV.2023.2.61.04

Vargas, F., Lucena, E., Zoltan, T., Torres, Y., León, M., Angulo, B., y Tovar, I. (2023). Photochemical and sonochemical strategies in Advanced Oxidation Processes for micropollutant treatment [ISBN 9781032162911]. En *Oxidation Processes for Micropollutant Remediation. 1st Edition* (pp. 167-180). Taylor & Francis Group. https://doi.org/10.1201/9781003247913-4

Wang, Z., Song, X., Huang, H., Chang, M., y Chen, Y. (2023). Enzyodynamic therapy at nanoscale. *MedComm – Biomaterials and Applications*, *2*(3), e53. https://doi.org/10.1002/mba2.53

Yang, B., Chen, Y., y Shi, J. (2019). Reactive Oxygen Species (ROS)-Based Nanomedicine. *Chemical Reviews*, *119*(8), 4881-4985. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00626

Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL)
Revista Electrónica Conocimiento Libre y Licenciamiento (CLIC), Mérida – Venezuela
ISSN: 2244-7423

La metamorfosis capitalista: Infraestructura digital, debate teórico e impacto socioambiental

A metamorfose capitalista: Infraestrutura digital, debate teórico e impacto socioambiental

Capitalist metamorphosis: digital Infrastructure, theoretical debate, and socio-environmental impact

Lena Sánchez
Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela
lenaulahistoria@gmail.com

Fecha de recepción: 05/08/2026
Fecha de aceptación: 21/10/2026
Pág: 125 – 144
DOI: 10.5281/zenodo.23888344

Resumen

Este artículo examina la metamorfosis contemporánea del capitalismo impulsada por la digitalidad, la datificación y la automatización algorítmica. El trabajo analiza cómo la incorporación al entorno digital ha configurado un régimen de concentración de poder apoyado en la monopolización de la infraestructura física, la potencia de cómputo y las plataformas de extracción. Mediante un enfoque analítico-documental fundamentado en la Historia de las Ideas Políticas y la Economía Política Crítica, se contrastan teóricamente las corrientes continuistas y discontinuistas. Asimismo, se explora la supuesta inmaterialidad de la economía digital al revelar su ontología relacional y las dimensiones materiales que la sostienen: centros de datos, redes transcontinentales de fibra óptica y el uso intensivo de energía, agua y minerales raros. Se concluye que, más allá de la disputa sobre la ruptura o continuidad sistémica, el sistema económico capitalista funciona como un régimen dual de extracción que captura el excedente conductual de la vida cotidiana y profundiza las asimetrías geopolíticas entre el Centro y la Periferia Global, perpetuando un patrón expoliativo y de degradación socioambiental.

Palabras clave: capitalismo, digitalidad, excedente, infraestructura, tecnofeudalismo.

Esta obra está bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0.

Resumo

Este artigo examina a metamorfose contemporânea do capitalismo impulsionada pela digitalidade, pela dataficação e pela automação algorítmica. O trabalho analisa como a incorporação ao ambiente digital configurou um regime de concentração de poder apoiado na monopolização da infraestrutura física, do poder computacional e das plataformas de extração. Por meio de uma abordagem analítico-documental fundamentada na História das Ideias Políticas e na Economia Política Crítica, confrontam-se teoricamente as correntes continuístas e descontinuístas. Além disso, explora-se a suposta imaterialidade da economia digital ao revelar sua ontologia relacional e as dimensões materiais que a sustentam: centros de dados, redes transcontinentais de fibra óptica e o uso intensivo de energia, água e minerais raros. Conclui-se que, para além da disputa sobre a ruptura ou continuidade sistêmica, o sistema econômico capitalista funciona como um regime dual de extração que captura o excedente comportamental da vida cotidiana e aprofunda as assimetrias geopolíticas entre o Centro e a Periferia Global, perpetuando um padrão de espoliação e degradação socioambiental.

Palavras-chave: capitalismo, digitalidade, excedente, infraestrutura, tecnofeudalismo.

Abstract

This article examines the contemporary metamorphosis of capitalism driven by digitality, datafication, and algorithmic automation. The paper analyzes how incorporation into the digital environment has shaped a regime of power concentration supported by the monopolization of physical infrastructure, computing power, and extraction platforms. Through an analytical-documentary approach grounded in the history of political ideas and critical political economy, continuist and discontinuist approaches are theoretically contrasted. Likewise, it explores the alleged immateriality of the digital economy by revealing its relational ontology and the material dimensions that sustain it: data centers, transcontinental fiber optic networks, and the intensive use of energy, water, and rare minerals. It concludes that, beyond the dispute over systemic rupture or continuity, the digital economy functions as a dual regime of extraction that captures the behavioral surplus of everyday life and deepens geopolitical asymmetries between the Center and the Global Periphery, perpetuating a spoliative pattern of socio-environmental

degradation.

keywords: capitalism, digitality, surplus, infrastructure, techno-feudalism.

Introducción

La expansión de la Digitalidad se ha acelerado en las últimas décadas impulsada por la datificación de la experiencia y la automatización algorítmica. En este trayecto, el fenómeno ha transitado del discurso utópico de principios de milenio, que la concebía como una fuerza democratizadora capaz de disolver las asimetrías históricas, hacia una severa dinámica de concentración de poder. Allende las promesas de horizontalidad, la incorporación al entorno digital se ha dado de forma profundamente desigual: mientras la población sostiene el sistema mediante su interacción cotidiana, un reducido entramado corporativo-estatal monopoliza la base física, la capacidad de cómputo y las plataformas de extracción, sentando las bases de una reconfiguración estructural del capitalismo.

Con el fin de abordar esta transformación, se analizan los aportes teóricos sobre el régimen de acumulación contemporáneo que van desde el capitalismo cognitivo y de plataformas, hasta el capitalismo rentista, el capitalismo de vigilancia o la tesis del tecnofeudalismo. Teniendo en cuenta que gran parte de estos enfoques tiende a privilegiar la dimensión inmaterial de la Digitalidad, dejando en segundo plano el costo socioambiental que este fenómeno lleva aparejado. A partir de lo planteado, el presente artículo se organiza en torno a la siguiente interrogante: ¿De qué manera el origen y desarrollo histórico de la Digitalidad han configurado la naturaleza de la actual metamorfosis capitalista, y en qué medida las principales corrientes interpretativas logran dar cuenta de esta transformación? Para abordar esta interrogante, el trabajo adopta un enfoque analítico-documental fundamentado en la Historia de las Ideas Políticas y la Economía Crítica.

Bresciano (2010) señala lo siguiente: “En los grandes procesos de la Historia mundial, las revoluciones tecnocognitivas cumplen un papel no desdeñable, ya que los modos en que la información se registra, almacena, centraliza y difunde, afectan -directa o indirectamente- a las estructuras políticas, económicas, sociales y culturales” (p. 9). Lo contrario también es cierto, los sistemas económicos dominantes inciden profundamente en el desarrollo y despliegue de estas revoluciones tecno cognitivas. De allí que el estudio de la metamorfosis capitalista exige superar visiones unidireccionales y asumir esta interdependencia estructural como punto de partida.

Por otro lado, el análisis histórico de la Digitalidad resulta incompleto si no se tienen en cuenta las relaciones de poder que imponen la emergencia de sus soportes físicos, su

impacto territorial y sus dinámicas de expoliación en la periferia. Con el objetivo de desarrollar este argumento, el texto se articula en cuatro momentos. Primero, se expone la narrativa utópica de principios de siglo, luego se establece la cronología de las mutaciones capitalistas; a continuación, se examina qué es la Digitalidad y el desarrollo histórico de la infraestructura física, la arquitectura lógica y las plataformas donde se concreta la extracción de datos. Y más adelante, se realiza la contrastación crítica de las principales corrientes interpretativas actuales, para finalmente revelar el impacto socioambiental que evidenciaría la continuidad de un patrón expoliativo propio del sistema económico capitalista.

La digitalidad en el discurso

El estreno de The Matrix en 1999 constituye un síntoma cultural y discursivo que se venía gestando desde la segunda mitad del siglo XX en la narrativa de la ciencia ficción; una advertencia contra el optimismo tecnológico de fin de milenio. La obra presenta un entorno donde la interconexión funciona como un simulacro adictivo en el que el sujeto queda atrapado en un bucle virtual mientras su corporeidad se transforma en recurso energético. De este modo, la película no sólo anticipó las tensiones en la era de la Digitalidad, sino que prefiguró alegóricamente la captura de la corporeidad y la experiencia humana como recurso productivo.

Tras los hechos del 11 de septiembre del 2001 el uso de las tecnologías de la información como herramientas de vigilancia estatal se halló plenamente justificado. Por otro lado, en 2003, la ONU convocó a la primera fase de la Cumbre Mundial sobre la Sociedad de la Información (CMSI) en Ginebra, evento que formalizó un discurso utópico institucional fundamentado en una sociedad integradora orientada al desarrollo. Allí, las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) se presentaron como instrumentos esenciales para alcanzar los Objetivos de Desarrollo del Milenio. La Declaración de Principios de la CMSI propuso transformar la brecha digital en una oportunidad estratégica para las naciones en desarrollo (CMSI, 2003).

Años más tarde, ese optimismo de la conectividad se hacía mucho más patente en la narrativa oficial del Foro Económico Mundial de Davos en 2016. Klaus Schwab, su fundador, destacaba en aquel entonces:

> La Primera Revolución Industrial utilizó la energía hidráulica y de vapor para mecanizar la producción. La Segunda empleó la energía eléctrica para impulsar la producción en masa. La Tercera empleó la electrónica y la tecnología de la información para automatizar la producción. Ahora, una Cuarta Revolución Industrial se basa en la Tercera: la revolución digital, que se viene produciendo desde mediados del siglo pasado. Se caracteriza por una fusión de tecnologías que difumina las fronteras entre las esferas física, digital y biológica (Schwab, 2016).

Es decir, cada revolución histórica trajo consigo una transformación en la producción. Desde la mecanización hasta la automatización, el foco siempre estuvo en la producción. Sin

embargo, ante la Cuarta Revolución Industrial cabe preguntarse: ¿qué se produce realmente? Si examinamos la progresión que propone Schwab, se evidencia que en las tres etapas previas la tecnología era un medio, y el insumo constituía la materia prima tangible. El ser humano participaba en la ecuación como trabajador y consumidor de mercancías, y todo el sistema económico se erigía sobre esa base. Pero, al "difuminar las fronteras entre lo físico, lo digital y lo biológico", la materia prima ya no es el hierro o el petróleo, sino la atención, los datos biométricos, los hábitos de consumo y las interacciones sociales.

En la Cuarta Revolución Industrial no se produce un nuevo tipo de mercancía. Ahora, la vida cotidiana y la conducta humana son el insumo primario y el producto final. Al no predominar la producción de bienes clásicos, esta arquitectura genera predicción y modificación conductual: los datos extraídos de las esferas biológica y digital se procesan mediante aprendizaje automático para anticipar y moldear decisiones comerciales, políticas y socioculturales. De este modo, más que ganancias por ventas industriales, el sistema extrae rentas mediante el control de los espacios y plataformas digitales donde transcurre la vida social. Bajo esta dinámica, ámbitos previamente ajenos al mercado, como el sueño, las emociones, la ubicación geográfica en tiempo real o el ritmo cardíaco, son integrados al ciclo de acumulación, lo que constituye una reconfiguración socioeconómica que atraviesa incluso las dimensiones políticas y culturales.

Desarrollo

El capitalismo y sus mutaciones

Las instituciones del orden económico dominante conceptualizan este sistema desde sus pilares neoclásicos y de economía política. Desde la perspectiva institucional del Fondo Monetario Internacional (FMI), el capitalismo se define como un orden económico en el que los agentes privados poseen y controlan tanto los bienes de capital tangibles como los activos intangibles según su propio interés, situando a la motivación de utilidades como su característica esencial (Jahan y Mahmud, 2015). Bajo este esquema, un mecanismo de mercado descentralizado regula la asignación de capital y trabajo a través de los precios determinados libremente por la oferta y la demanda. Así, la libre competencia y la autonomía de elección se erigen en la norma, mientras que el Estado debe limitar su función a la protección de los derechos de propiedad y a la preservación de un entorno regulatorio predecible que impida la distorsión del mercado (Jahan y Mahmud, 2015).

En contraste, Bernard (1978) recuerda que "el capital, según Marx y toda la ciencia económica materialista dialéctica, 'no es una cosa, sino una determinada relación de producción"' (p. 17). En otras palabras, el capital se define por los vínculos sociales desiguales que se establecen durante la producción entre quienes poseen los medios y quienes solo disponen de su fuerza de trabajo. Trasladar esta perspectiva dialéctica al entorno contemporáneo permite advertir que, detrás de la aparente gratuidad de las plataformas digitales, subyace esta misma

estructura histórica de relaciones sociales orientada a la extracción de valor.

La economía política crítica propone además que el sistema muta históricamente para asegurar la extracción de valor. En esta línea, el profesor e investigador de la evolución del capitalismo Condis et al. (2025) sostiene que nos encontramos en el umbral de una Tercera Revolución Capitalista (RC3) una transición profunda donde el motor de la acumulación se desplaza de la explotación de la naturaleza material hacia la explotación sistemática de la naturaleza humana, cuya experiencia y comportamiento son transformados hoy en la mercancía más lucrativa: los datos.

La Primera Revolución Capitalista (siglos XVIII-XIX) representó el nacimiento de este orden al transitar del sistema feudal al industrialismo impulsado por el vapor y el carbón. En esta etapa fundacional, los factores de producción sufrieron su primera gran reconfiguración técnica y jurídica: mediante los cercamientos (*enclosures*), la tierra dejó de ser un espacio de subsistencia comunal para convertirse en un recurso extractivo y en el soporte físico de la fábrica; el individuo se vio obligado a vender su fuerza de trabajo en el mercado y el capital se consolidó en la propiedad física de la maquinaria pesada.

Posteriormente, durante el siglo XX, la Segunda Revolución Capitalista refinó el modelo mediante el uso de la electricidad, el petróleo y la implementación de la cadena de montaje fordista. En esta fase se priorizó el control estratégico de las rutas comerciales y la energía fósil; el trabajo se estandarizó y dio paso al obrero especializado, fomentando el surgimiento de una clase media con capacidad adquisitiva. El capital mutó hacia estructuras corporativas transnacionales y esquemas de capital financiero monopolista. La implicación clave de esta etapa fue el reconocimiento de que la estabilidad del sistema dependía de que el trabajador fuera, simultáneamente, un consumidor activo, cimentando así la sociedad de consumo masivo como pilar fundamental del crecimiento económico.

En la actual Tercera Revolución Capitalista, desarrollada en el marco de una economía digital, el capital transforma el comportamiento, el deseo y la experiencia en datos procesables mediante algoritmos, el sistema ha encontrado una nueva frontera de expansión basada en la explotación cognitiva. Aquí, el individuo deja de ser solo un trabajador-consumidor para transformarse en el yacimiento mismo del que se extrae el capital predictivo.

Condis et al. (2025) plantean que esta Tercera Revolución se define como una fractura donde la desmaterialización del capital alcanza su expresión absoluta: el eje de acumulación se desplaza de la máquina física (RC1) y el capital financiero (RC2) hacia factores intangibles como el dato, la conectividad y la Inteligencia Artificial (IA). Lo que define esta era es la naturaleza disruptiva del dato como materia prima: a diferencia de los recursos tradicionales, el dato es omnipresente y se autorregenera infinitamente a través de la actividad humana, rompiendo aparente o parcialmente con las leyes clásicas de la escasez y los costes de producción

proporcionales. Al respecto, los autores señalan:

> La IA es simplemente una combinación de algoritmos cognitivos, ubicuidad de datos, conectividad casi en tiempo real y potencia de cálculo exponencial, que hace que una máquina sea finalmente capaz no solo de automatizar lo que hace un humano, sino también de predecir opciones, decidir de forma autónoma operar, reemplazar al humano en la decisión a ejecutar y, al final, reemplazarlo en el proceso creativo de inventar y diseñar algo (p. 80).

Sin embargo, esta capacidad de la IA para desplazar la decisión y la creatividad humana no funciona en el vacío: requiere de esa incesante "ubicuidad de datos" que solo el flujo continuo de la vida social puede proveer. Se revela así una paradoja fundamental entre la supuesta inmaterialidad del proceso digital y la evidente materialidad del sujeto que lo alimenta. Aunque los datos parecen emanar de una fuente inagotable y gratuita para las corporaciones, el individuo que los genera posee necesidades vitales, límites biológicos y costes de existencia. En este sentido, la extracción de datos guarda una simetría particular con el trabajo doméstico no remunerado. En ambos casos, el modo de producción se beneficia de un proceso de despojo donde se captura el valor de la actividad vital del sujeto a cambio de servicios cuyo costo marginal tiende a cero, invisibilizando el costo real de reproducción de la vida que sostiene a la propia infraestructura digital.

Desde esta lectura se advierte que nos encontramos ante un intercambio injusto, porque el usuario viene a convertirse en una especie de unidad operativa para la extracción de un recurso no remunerado, o escasamente remunerado en todo caso. La IA como sustituto cognitivo no existiría sin la energía y el tiempo de vida de los seres humanos convertido en datos para nutrir los algoritmos de aprendizaje automático. El costo cero es un espejismo macroeconómico cuyo gasto real es asumido por el cuerpo y la cotidianidad del usuario, mientras que el beneficio se privatiza, convirtiendo a la economía digital en un régimen de extracción de valor de la vida social preexistente.

Andrejevic (2007), explica cómo funciona este fenómeno, ya que la extracción resulta ser un proceso muy sutil, pero no por sutil resulta menos efectivo. El autor denomina "cercamiento digital" (*digital enclosure*) a la privatización y uso exclusivo de estos datos extraídos que son, como ya se ha comentado, la materia prima de esta economía digital. Volviendo sobre el fenómeno de los cercamientos de los albores del advenimiento del capitalismo, en la fase actual las plataformas han cercado la interacción social, los afectos, el conocimiento y las capacidades creativas para luego comerciar con ellas:

> Existe un patrón aquí: el uso de tecnologías interactivas —dispositivos de nuevos medios— se presta a la generación de información cibernética: retroalimentación sobre las propias transacciones. Esta retroalimentación se convierte en propiedad de empresas privadas que pueden almacenar, agregar, clasificar y, en muchos

> casos, vender la información a terceros en forma de base de datos o de mercancía cibernética (Andrejevic, 2007, p. 3).

En este contexto, el capital construye entornos atractivos como aplicaciones, redes y sistemas operativos, que se han vuelto indispensables para la reproducción de la vida social y económica, entrar a estos recintos es gratuito y extremadamente accesible, pero exige la aceptación de contratos de adhesión, los llamados "Términos y Condiciones", que actúan como un peaje donde el usuario cede el control y la propiedad de su información a cambio de su participación en el espacio digital.

Una vez dentro del espacio cercado, la arquitectura lógica ejecuta una extracción continua e invisibilizada que captura clics, ubicaciones, afectos y datos biométricos, traduciendo la cotidianidad en insumo para la acumulación. Esta "minería" de la cotidianidad es lo que permite entrenar a las Ias y construir modelos predictivos capaces de modificar la conducta, la intención de compra o el voto: dispositivos altamente valorados en el mercado contemporáneo.

Tal reconfiguración actualiza una dinámica analizada por Polanyi (1989) respecto a la emergencia del mercado autorregulado. Así como el capitalismo histórico convirtió la tierra, el trabajo y el dinero en mercancías ficticias, es decir, elementos no producidos originalmente para la compraventa, el régimen digital actual establece una cuarta mercancía ficticia: el dato conductual (Zuboff, 2020). Al respecto, la autora señala:

> En esta nueva lógica, la experiencia humana queda subyugada por los mecanismos de mercado del capitalismo de la vigilancia y renace en forma de "conducta". Estas conductas son rendidas-convertidas en forma de datos preparados para ocupar su lugar en una innumerable cola de ellos que alimenta las máquinas de fabricación de predicciones, unas predicciones que son los productos finales que se intercambian en los nuevos mercados de futuros conductuales (p. 128).

Extraída de un entorno cotidiano originalmente ajeno a la lógica mercantil, hoy día la información derivada de la experiencia humana y de los datos que arroja el uso continuo de estos espacios de relacionamiento social está bajo el control y la explotación monopólica de las plataformas, en estos espacios se transforma en la materia prima clave para la extracción de rentas y la modificación del comportamiento a escala global.

La digitalidad

Para comprender la infraestructura técnica sobre la que funciona este modelo de extracción de datos, resulta indispensable descender a la ontología del fenómeno. En este sentido, antes de abordar el proceso histórico de desarrollo de la Digitalidad, conviene delimitar sus rasgos fundamentales. Para Hui (2016), el dato trasciende su raíz latina (*datum*, "lo dado") al adquirir, a partir de 1946, el sentido de información computacional transmisible y almacenable,

constituyendo una nueva "dación" material que opera entre humanos y máquinas (p. 48). Por otro lado, lo digital se define específicamente por la automatización del procesamiento de datos y la capacidad de extender el intercambio de información entre redes, bases de datos y plataformas dentro de un sistema técnico amplio (p. 49).

El objeto digital es una categoría particular de objeto industrial que se formaliza mediante datos y metadatos, diferenciándose de una generalización abstracta al ser configurado por la agencia humana y reconocido funcionalmente por las máquinas (Hui, 2016, p. 50). En pocas palabras, los datos son la información que procesan las computadoras, lo digital es la red y el sistema automatizado que permite mover y conectar esa información, y el objeto digital es el resultado de estructurar esos datos mediante metadatos para que tanto las personas como las máquinas podamos interactuar con ellos como unidades concretas (como un archivo, una publicación o un perfil). En conjunto, Yuk Hui demuestra que lo digital constituye una nueva realidad material hecha de objetos concretos con los que convivimos, operamos y construimos nuestro entorno cotidiano.

Lo siguiente viene a complementar esta visión. De acuerdo con Floridi (2002, p. 14), "la computación es solo uno (aunque quizás el más importante) de los procesos en los que la información puede estar involucrada". Aquí, el objeto digital estructurado por Hui funciona como la herramienta concreta que ejecuta la "desfisicalización" (*de-physicalisation*) del mundo material. Es decir, permite convertir las interacciones humanas y los bienes tangibles en datos procesables y "objetos semánticos", los cuales pasan a constituir la trama de la infoesfera contemporánea.

Ahora bien, desde el enfoque de la Economía Política, la Digitalidad y la economía digital representan un nuevo régimen de acumulación y reestructuración capitalista surgido históricamente para contrarrestar la caída de la rentabilidad en la manufactura tradicional mediante la explotación de una nueva materia prima: los datos. Bajo este filtro, Srnicek (2018) define la economía digital como el conjunto de negocios que dependen cada vez más de la tecnología de la información, los datos e Internet para la viabilidad de sus modelos de producción (p. 13). Las infraestructuras digitales y las plataformas emergen entonces como aparatos de captura donde "los datos son la materia prima que debe ser extraída, y las actividades de los usuarios, la fuente natural de esta materia prima" (p. 42).

Lo planteado hasta aquí obliga a establecer tres conceptos necesarios para explicar el origen y desarrollo de la Digitalidad: la infraestructura digital, la arquitectura lógica y las plataformas digitales. En el régimen de acumulación digital, la infraestructura está integrada por cables, centros de datos y dispositivos. Es la que sostiene el espacio virtual de las plataformas donde se manifiesta la captura de datos. Al dominar este cimiento material, corporaciones como Alphabet Inc. consolidan un monopolio de red que trasciende la sola exacción de rentas (Srnicek, 2018, pp. 60-65). Sobre esta base física se articula la arquitectura, cuyos algoritmos

ejecutan la refinación de la información obtenida. De este modo, la extracción masiva depende directamente de la escala técnica: la potencia material de la infraestructura constituye el requisito indispensable para que la arquitectura algorítmica transforme los flujos de conducta en insumo de capital. Pero además, esta infraestructura consume enormes cantidades de energía.

La arquitectura lógica hace referencia al conjunto de códigos de programación, algoritmos, protocolos, metadatos y reglas fijas que organizan, gobiernan y controlan el funcionamiento interno de las plataformas. Esta arquitectura no es neutral: obedece a una política de diseño que define los límites, las posibilidades de interacción y las reglas del juego que los usuarios deben aceptar de manera obligatoria para poder participar en los entornos digitales. Por último, las plataformas digitales son los espacios que se posicionan como intermediarios en las relaciones sociales, afectivas o económicas, generando redes de usuarios y articulando procesos socioculturales y económicos.

Infraestructura, arquitectura lógica y plataformas digitales

La infraestructura digital constituye el resultado de una trayectoria histórica de inversión colectiva y un diseño político fundamentado en recursos públicos que posteriormente fueron privatizados. Mazzucato (2021) señala que el desarrollo de las tecnologías críticas no nació del libre mercado, con genios del software en garajes de Sillicon Valley, sino de misiones estratégicas lideradas por el Estado, cuya génesis moderna se sitúa en la respuesta institucional ante el lanzamiento del Sputnik en 1957. En aquel escenario, la carrera espacial funcionó bajo un modelo en el que el sector público ejerció como director estratégico y cliente exigente, impulsando innovaciones de alto riesgo mediante contratos de investigación y desarrollo. Esta maniobra estatal, que daría origen a agencias como DARPA y a la red ARPANET, demuestra que la infraestructura digital primaria fue financiada mediante la socialización del riesgo público, sentando las bases materiales que décadas más tarde serían privatizadas y comercializadas por el capital corporativo.

El desarrollo de esta infraestructura se sostuvo originalmente bajo la Ley de Telecomunicaciones de 1934 en Estados Unidos, la cual definía a las telecomunicaciones como un servicio público esencial; dicha norma aceptaba ciertos esquemas monopólicos a cambio de garantizar precios estables y acceso universal. La tendencia regulatoria refleja el rol estatal en la protección del interés colectivo y la fijación de tarifas. Sin embargo, la Ley de Telecomunicaciones (Telecommunications Act) de 1996 abandonó este enfoque al imponer un marco desregulado que reclasificó el acceso a la red como un "servicio de información". Este giro normativo facilitó la captura oligopólica de la infraestructura estatal y funcionó como un cercamiento jurídico que convirtió una red financiada con recursos públicos en un sistema de peaje privado. La transición de ARPANET hacia su comercialización consolidó el paso de la comunicación como derecho garantizado al territorio de la renta corporativa.

Sobre estas bases se gestó la hegemonía de corporaciones como Google (Alphabet Inc.). Surgida a finales del siglo XX como una plataforma digital destinada a la intermediación en el acceso a la información, la compañía comprendió que su dominio requería controlar las demás dimensiones del sistema. De este modo, en los primeros años del siglo XXI, Google desarrolló una arquitectura lógica propietaria sostenida en algoritmos de procesamiento masivo, reglas de diseño y software de orquestación como Borg, y descendió de manera decisiva hacia la infraestructura digital. Esta integración se llevó a cabo en la construcción de computadoras a escala de almacén (centros de datos), el diseño de procesadores especializados en Inteligencia Artificial (*Tensor Processing Units* o TPU) y el despliegue de cables submarinos transcontinentales.

Históricamente la capacidad de red internacional estuvo dominada por operadores tradicionales (*carriers*), hoy un pequeño grupo de proveedores en la nube, encabezados por Google, Meta, Amazon y Microsoft, concentra la demanda planetaria. Como documenta TeleGeography (2023), para 2021 estas corporaciones pasaron a controlar el 69 % del ancho de banda internacional utilizado a escala global, alcanzando un 92 % en el corredor transatlántico. Al financiar directamente cables submarinos y adquirir "pares de fibra óptica dedicados", es decir, de uso exclusivo, este oligopolio evita la dependencia de terceros, pero también privatiza las arterias mismas de la comunicación global.

Esta expansión de la infraestructura digital exige el control de una magnitud territorial que colisiona abiertamente con los límites ecológicos del planeta. El despliegue de 17 nuevos centros de datos masivos y la planificación de al menos 50 instalaciones adicionales (TeleGeography, 2023) ponen en entredicho la narrativa corporativa de la "nube" inmaterial. Tan solo en 2022, el consumo eléctrico de los centros de datos en los ocho principales mercados de interconexión alcanzó los 4,2 gigavatios (GW), una demanda equivalente a 3,4 millones de hogares (TeleGeography, 2023).

Lo anterior revela una carga ecológica considerable, a esta huella se suma el incremento cercano al 50 % en las emisiones de gases de efecto invernadero de Alphabet desde 2019, impulsado por la demanda de los modelos de lenguaje como Gemini, así como la degradación ambiental derivada del refinamiento de tierras raras (neodimio, terbio, disprosio y lantano) indispensables para los discos duros y procesadores. Esta escala de extracción hídrica, energética y mineral ha generado severas fricciones socioambientales en nodos estratégicos como el norte de Virginia, Frankfurt, Ámsterdam y Singapur, forzando a los Estados a imponer restricciones regulatorias al impacto ambiental de estas instalaciones.

En la dinámica de acumulación digital, la consolidación de la infraestructura exige una concentración de capital sin precedentes. Según el informe financiero anual presentado ante la *Securities and Exchange Commission*, Alphabet Inc. (2026) expandió el valor neto de su propiedad y equipo físico a 246.597 millones de dólares en el ejercicio 2025 y ejecutó un gasto de

capital anual de 91.400 millones destinado prioritariamente a la expansión de centros de datos y capacidad de cómputo. En el mismo reporte, la compañía proyecta incrementos sustanciales en sus inversiones materiales para los periodos siguientes y declara compromisos contractuales de arrendamiento de infraestructura futura por 58.500 millones de dólares (Alphabet Inc., 2026).

Esta inyección financiera intensifica notablemente la escala física de cables y servidores que alimentan la arquitectura algorítmica, pero además erige una barrera de entrada inalcanzable para otros actores. Esta inversión se sostiene mediante un modelo de doble extracción: por un lado, la publicidad digital genera el 73,1 % de los ingresos totales de la corporación, el equivalentes a 294.691 millones de dólares, mediante la comercialización de la atención y la subasta en milisegundos de perfiles conductuales; por otro lado, la división Google Cloud, cuyos ingresos ascendieron a 58.705 millones de dólares tras duplicar su margen operativo, alquila su capacidad de almacenamiento y cálculo a entidades bancarias, aerolíneas, plataformas de streaming y empresas de Inteligencia Artificial, obligando al tejido productivo global a pagar una renta infraestructural antes que asumir los costos prohibitivos de erigir una red propia (Alphabet Inc., 2026).

Como señala con pragmatismo Varian (2013), economista jefe de Google y uno de los teóricos principales de la microeconomía de la información: "*Data collection and analysis is what everyone is talking about when they talk about 'big data'* "(p. 1). Desde el prisma neoclásico que abandera Varian, esta recolección masiva se legitima como un mecanismo para resolver las fallas de información del mercado, permitiendo que la publicidad personalizada coordine de forma óptima las necesidades del consumidor con la oferta de las empresas.

Sin embargo, lo que la microeconomía tradicional celebra como un ajuste eficiente que reduce costos de búsqueda, Zuboff (2020) lo señala como la expropiación unilateral del excedente conductual. La recolección de datos no se limita a registrar preferencias preexistentes del mercado, sino que reconfigura activamente la conducta de los usuarios. Varoufakis (2024) ilustra este proceso mediante la interacción con asistentes de voz y sistemas de inteligencia artificial doméstica, revelando la naturaleza bidireccional del aprendizaje algorítmico:

> Una vez que hemos entrenado su algoritmo y le hemos proporcionado datos sobre nuestros hábitos y deseos, Alexa empieza a entrenarnos a nosotros. ¿Cómo lo hace? Al principio nos incita discretamente a que le demos más información sobre nuestros caprichos, que luego adapta para acceder a vídeos, textos y música que nos gusten. Cuando ya nos ha ganado con esto, nos volvemos más sugestionables ante sus indicaciones. En otras palabras, Alexa nos entrena para que la entrenemos mejor. El siguiente paso es más espeluznante: tras habernos impresionado con su capacidad para conocer nuestros gustos, procede a seleccionarlos. Lo hace exponiéndonos a imágenes, textos y vídeos que elige para condicionar con sutileza nuestros deseos (p. 56).

La gran red algorítmica de la nube permite a los propietarios de estos espacios digitales modificar progresivamente el comportamiento de los usuarios, erigiendo lo que Varoufakis (2024) denomina capital de mando: una capacidad destinada a dirigir la acción y la atención humana. Esta noción de mando fue planteada también en la teoría del capitalismo de vigilancia desarrollada por Zuboff (2020). Para la autora, la verdadera innovación de esta era no radica en la conectividad técnica, sino en la captura del excedente conductual.

Lo que Varoufakis (2024) describe como un bucle de entrenamiento mutuo entre el usuario y la plataforma, Zuboff (2020) lo define como una forma inédita de expropiación de la experiencia humana cotidiana. En este dispositivo, la libertad de elección del individuo queda subordinada a un proceso de modificación de conducta orientado a predecir y fabricar comportamientos futuros, transformando la privacidad en la materia prima más lucrativa del ecosistema digital. Zuboff (2020) añade que "los datos son la materia prima necesaria para los novedosos procesos de fabricación del capitalismo de la vigilancia" (p. 83).

La extracción describe un vínculo simbólico o informacional que define las relaciones sociales reales. Así, el circuito de la economía política del espacio digital se completa: la infraestructura digital, los centros de datos y la fibra óptica, aporta el soporte físico masivo para que la arquitectura lógica, es decir los algoritmos, procese el excedente conductual extraído en la plataforma digital, convirtiendo la experiencia humana en la base de un nuevo tipo de acumulación. Así la infraestructura digital funciona como una refinería de la experiencia cotidiana cuya concentración monopolística exige precisar si la acumulación contemporánea responde aún a las leyes del beneficio capitalista tradicional o si ha inaugurado un régimen de renta infraestructural extractiva asentado sobre la propiedad privada del espacio digital.

Metamorfosis capitalista

Una vez examinada la base material de la infraestructura digital y la función del diseño algorítmico como refinería de la experiencia cotidiana, resulta necesario determinar la naturaleza teórica del sistema socioeconómico que se erige sobre este aparato. Desde la ortodoxia liberal y la tradición inaugurada por Schumpeter (1942/2010), la hegemonía de las grandes corporaciones tecnológicas suele justificarse como una manifestación de la "destrucción creativa". Bajo este enfoque, la competencia no ocurre dentro del mercado sino por el mercado, por lo que el liderazgo de firmas como Alphabet o Meta sería un fenómeno transitorio, expuesto a ser desplazado por la constante disrupción de nuevos emprendedores e innovaciones técnicas. Sin embargo, análisis contemporáneos (Srnicek, 2018; Zuboff, 2020) coinciden en que la concentración de infraestructura y el control de datos han desarticulado este esquema competitivo idealizado.

Las voces críticas hoy se encuentran divididas entre quienes caracterizan este fenómeno como una mutación adaptativa dentro de la trayectoria histórica del capitalismo, la postura

continuista, y quienes afirman que la mediación técnica ha traspasado las fronteras de la economía de mercado para inaugurar un modo de producción cualitativamente distinto, denominado tecnofeudalismo u orden postcapitalista, es decir, la postura discontinuista.

A continuación el texto presenta una contrastación teórica que busca, sobre el diagnóstico del funcionamiento de la economía digital, establecer los rasgos fundamentales de las formas contemporáneas del sistema económico y las relaciones de producción que impone. Para evaluar los alcances y límites de ambas corrientes interpretativas, el presente análisis propone cinco categorías clave de la economía política crítica: a) la dinámica de acumulación; b) la relación social de producción; c) el espacio de mediación; d) la frontera de apropiación; y e) el ámbito geopolítico. Bajo este esquema se examinan a continuación las principales tesis en disputa.

Corriente continuista: La exacerbación del capitalismo

La postura continuista sostiene que el desarrollo de la economía digital constituye una respuesta adaptativa del capital. Desde esta perspectiva, autores como Nick Srnicek, Shoshana Zuboff y Brett Christophers conciben la digitalización como la fase más sofisticada de la acumulación capitalista: una metamorfosis en la que las leyes del mercado no desaparecen, sino que se profundizan mediante la mediación algorítmica y la monopolización infraestructural. A través de este marco, la lectura continuista rechaza categóricamente la hipótesis de una ruptura postcapitalista.

- Dinámica de acumulación: La ganancia tecnológica constituye la mutación del beneficio industrial hacia la renta infraestructural corporativa. Para Christophers (2020), la privatización de activos clave permite a las corporaciones funcionar como rentistas que cobran peajes por el acceso a sus plataformas, evitando el riesgo productivo tradicional. En convergencia con este diagnóstico, Srnicek (2018) señala que la plataforma surge precisamente como una respuesta estructural a la crisis de sobrecapacidad industrial y a la caída de la rentabilidad.

- Frontera de apropiación: Retomando la tesis de Rosa Luxemburgo sobre la necesidad del capitalismo de colonizar un "afuera" no mercantilizado, la era digital desplaza la frontera extractiva de la geografía física hacia la vida cotidiana. Argumenta Zuboff (2020), en este sentido que la novedad del capitalismo de vigilancia radica en la conversión de la experiencia humana no procesada en materia prima traducible en datos.

- Relación social de producción: La articulación entre la plataforma y el usuario adopta una dinámica parasitaria. El individuo deja de ser un cliente tradicional para convertirse en la fuente primaria de recursos a coste marginal cero. Las corporaciones privatizan las ganancias derivadas del uso del tiempo, la atención y la energía de los usuarios, mientras

la sociedad asume los costes biológicos y subjetivos de la reproducción socio-digital que alimenta el sistema.

- Espacio de mediación: El entorno digital reitera la lógica histórica de los cercamientos (*enclosures*) del siglo XVIII. Al mercantilizar la experiencia humana como materia prima conductual, se perpetúa el imperativo de acumulación mediante la extracción del excedente económico en los mercados de futuros de comportamiento. La propiedad privada sobre los medios de modificación de la conducta garantiza la reproducción de las asimetrías clásicas entre propietarios y desposeídos.

- Territorialización geopolítica: La acumulación digital exige una geografía concreta de extracción y dominación que profundiza el desarrollo geográfico desigual. La dimensión virtual se apoya en una colosal infraestructura física (centros de datos, cables submarinos, redes de energía) que reconfigura las dinámicas territoriales y reafirma las jerarquías del sistema-mundo capitalista en términos extractivos.

Corriente discontinuista: La mutación tecnofeudal

Desde el discontinuismo se afirma que la ganancia derivada de la producción e intercambio de mercancías ha sido desplazada por la renta de la nube (*cloud rent*) y la extracción monopolística, alterando la naturaleza misma del capitalismo. Autores como Yanis Varoufakis y Cédric Durand sostienen que la concentración informacional ha abolido la lógica de mercado para instaurar estructuras de dominación neo-señoriales.

Dinámica de acumulación: Para Varoufakis (2024), el "capital de la nube" destruye el libre mercado al erigir feudos digitales regidos por el cobro de peajes. Esta tesis se articula con el concepto de "capitalismo monopolista intelectual" analizado por Durand (2021), cap. 4, sección "La lógica del tecnofeudalismo", quien demuestra cómo las "firmas superestrellas" ejercen un control legal y exclusivo sobre el saber que constriñe la innovación. La acumulación contemporánea desplaza la inversión desde el desarrollo de las fuerzas productivas hacia el fortalecimiento de las "fuerzas de depredación", al punto de que figuras del propio capital financiero han advertido este riesgo:

Durante la edición 2018 del *World Economic Forum* de Davos, el multimillonario George Soros se entrega a una requisitoria implacable contra ellos: los monopolios de la era Internet, al tiempo que suministran servicios de interés general cruciales, traban la innovación, el buen funcionamiento de los mercados, y constituyen una amenaza para las libertades individuales y la democracia; a su juicio, es inevitable que una nueva reglamentación y nuevos principios fiscales vengan rápidamente a poner un término a esta situación (Durand, 2021, cap. 5, sección "El retorno de los monopolios").

- Frontera de apropiación: A diferencia del enfoque continuista, la lectura discontinuista sostiene que la frontera digital quebranta la lógica de mercado al disolver el trabajo asalariado como categoría única de valorización. La apropiación penetra en la dimensión íntima de la conducta mediante una automatización de la supervisión que invalida las fronteras laborales tradicionales. Como advierte Durand (2021) (cap. 1, sección "La preferencia por el control"), al "confiar a las máquinas la vigilancia, la evaluación y, por lo tanto, indirectamente, las decisiones que influyen en la remuneración de los trabajadores", la gestión humana es sustituida por un panóptico digital que anula la autonomía operativa.

- Relación social de producción: La relación capital-trabajo cede su lugar a una estructuración de servidumbre digital. Varoufakis (2024) conceptualiza este vínculo a través de la asimetría entre los "señores de la nube" y los "siervos de la nube", situando al empresariado tradicional como "vasallos" obligados a tributar por el uso de la infraestructura. Durand (2021) complementa este cuadro al describir la condición de usuarios y firmas subalternas como un estar "atados a la gleba digital", donde los altos costos de salida y los efectos de red bloquean toda movilidad fuera del feudo.

- Espacio de mediación: Las plataformas digitales representan la sustitución del mercado por feudos algorítmicos. En estos dominios de gobernanza privada, la entrada exige la aceptación de contratos de adhesión unilaterales (Términos y Condiciones). La arquitectura lógica de los algoritmos dicta la visibilidad y regula el acceso de forma unidireccional, eliminando el intercambio libre entre iguales y condicionando la interacción social a la rentabilidad del propietario de la plataforma.

- Territorialización geopolítica: Se instaura un orden tecno-imperial de vasallaje infraestructural donde la soberanía estatal queda subordinada al control de la nube (*Cloud Sovereignty*). La concentración de la capacidad de procesamiento en un bipolo corporativo (EE. UU.-China) obliga a los Estados dependientes y a los tejidos productivos locales a pagar tributos infraestructurales, consolidando un neoextractivismo asimétrico que vulnera la autonomía política de las periferias.

Maurice Dobb y la naturaleza de la coacción digital

Para dirimir si la economía digital representa la continuidad del capitalismo o una mutación cualitativa, las categorías históricas de Dobb (1972) ofrecen una clave teórica decisiva. El autor establece que la especificidad del modo de producción capitalista reside en la centralidad del trabajo libre: el sujeto, desprovisto de medios de producción, acude al mercado a vender su fuerza de trabajo mediante un contrato salarial. En este esquema, la coacción sobre el trabajador es estrictamente económica, mediada por la compulsión del mercado y la disciplina

del empleo. Por el contrario, el rasgo definitorio del feudalismo radica en la presencia de una coacción extraeconómica que impone tributos y adscripción forzosa por operar dentro del dominio señorial.

El sujeto del régimen digital, sea un repartidor de plataforma, un desarrollador, un creador de contenido o un usuario generador de datos, encarna una síntesis problemática entre ambas figuras: Por una parte, conserva la propiedad individual de sus herramientas periféricas, ordenador, teléfono, vehículo, y mantiene una libertad formal de elección o desconexión. Pero por otro lado, la utilidad operativa de sus herramientas depende enteramente de la infraestructura privatizada en la nube. La libertad formal queda entonces anulada por la adscripción forzosa a contratos unilaterales, donde la plataforma ejerce una autoridad extraeconómica y disciplinaria al alterar comisiones, modificar algoritmos de visibilidad o decretar la expulsión del ecosistema mediante el veto digital. En última instancia, el trabajador y el usuario contemporáneos operan bajo los medios de producción del capitalista, pero bajo las formas de subordinación, captura de renta y jurisdicción privada del señor feudal.

Capitalismo cognitivo

Cabe destacar que en este contexto de polarización entre el continuismo y la hipótesis del quiebre tecnofeudal, la tesis del capitalismo cognitivo formulada por Yann Moulier (2011) se alza como una propuesta intermedia. Boutang rechaza las lecturas lineales en las que la digitalización actúa como extensión del taller taylorista, pero desestima también el diagnóstico neo-feudal: la valorización sigue respondiendo a la compulsión de acumulación del capital, aunque su motivación ya no esté en el capital fijo físico ni en la fuerza de trabajo puramente metabólica. Como lo sintetiza el propio autor:

> Para definir adecuadamente este tercer tipo de capitalismo en proceso de formación, necesitamos poner en relación tres elementos: un tipo de acumulación, un modo de producción y un tipo específico de explotación del trabajo vivo [...]. Mientras que el capitalismo industrial se caracterizó por una acumulación basada principalmente en la maquinaria y la organización del trabajo manual [...], el capitalismo cognitivo constituye un sistema de acumulación diferente, en el cual la acumulación se fundamenta en el conocimiento y la creatividad... (Moulier, 2011, p. 56, traducción propia).

De esta manera, la mutación fundamental atañe al objeto central de expropiación y a la naturaleza misma del trabajo vivo. En lugar de centrarse en la maquinaria física (hardware), el capitalismo cognitivo busca apropiarse del cruce entre la mente humana (*wetware*: potencia cerebral y afectiva) y el conocimiento compartido (*netware*: las redes de información e inteligencia colectiva). La producción se transforma en creación de conocimiento mediada por la propia vida, donde la rentabilidad corporativa descansa en la captura de externalidades positivas: es decir, en la apropiación gratuita de las relaciones sociales, los datos y el saber

implícito generados espontáneamente fuera del tiempo de trabajo asalariado. De este modo, el cercamiento de la infraestructura digital permite al capital privatizar el rendimiento agregado de la cooperación social sin requerir la disolución del modo de producción capitalista.

Como plantea Crawford (2021), la metáfora de lo inmaterial se desdibuja cuando se examina la anatomía material del aparato digital: la "cooperación entre cerebros" y la inteligencia colectiva dependen indefectiblemente de una densa cadena de extractivismo geológico, minería de litio, tierras raras y un consumo hídrico y energético devastador, así como de la superexplotación del trabajo corporal altamente precario en las periferias del sistema-mundo: etiquetadores de datos, moderadores de contenido y trabajadores de la cadena logística. Al concentrar su atención en la valorización del conocimiento implícito, Moulier Boutang deja de lado la persistencia de las formas primarias de acumulación por desposesión y la pesada base biofísica que sostiene al algoritmo, límites que impiden concebir la economía digital como un régimen puramente postindustrial o emancipado de la materia.

Conclusiones: El costo ambiental y desigualdades entre centro y periferia

En respuesta a la interrogante central de este estudio, el análisis histórico demuestra que en la metamorfosis del capitalismo contemporáneo ha incidido de manera determinante la privatización corporativa de una infraestructura física e informacional financiada originalmente con recursos públicos. El trayecto revela una reconfiguración de la naturaleza del sistema que ha mutado desde la producción manufacturera e industrial tradicional hacia el cercamiento digital de la cotidianidad, y que esto mismo ha consolidado un régimen rentista asentado sobre la extracción del excedente conductual y el monopolio del cómputo y las redes. Se asume además que las corrientes interpretativas que intentan explicar esta transformación son complementarias: mientras la perspectiva continuista, capitalismo de plataformas, rentista y de vigilancia, explica la pervivencia de la mercantilización de la vida, el enfoque discontinuista, tecnofeudalismo, logra reflejar la emergencia de los mecanismos neo-señoriales de coacción extraeconómica, la captura de rentas infraestructurales en la nube y la sustitución del mercado libre por dominios de gobernanza privada.

Sin embargo, es necesario destacar lo siguiente: aunque el discurso en el Foro Económico Mundial de Davos y los organismos multilaterales de Ginebra promovió una narrativa donde la Cuarta Revolución Industrial se presentaba para borrar los límites materiales de la economía tradicional, enarbolando la Digitalidad como un proceso limpio e inmaterial, eludiendo estratégicamente el origen y desarrollo de la infraestructura física necesaria para sostener la economía digital, en términos materiales este fenómeno exige recursos ingentes y una base material de escala planetaria; por tanto, no se puede desligar la existencia de los algoritmos de su infraestructura, pues estos descansan en redes físicas de fibra óptica submarina, centros de datos con consumo ininterrumpido de energía eléctrica, sistemas de refrigeración con un

elevado gasto hídrico y la extracción continua de minerales raros.

Crawford (2021) en su análisis de la infraestructura de la inteligencia artificial, señala que los sistemas digitales actuales dependen de una captura coordinada de trabajo, datos y recursos geológicos. Por un lado, el sistema extrae la conducta, la atención y la información generada por los usuarios para alimentar los modelos algorítmicos; por el otro, la infraestructura de cómputo requiere apropiarse intensivamente de insumos minerales y energéticos, es decir, la infraestructura física funciona a partir de rocas, salmuera de litio, cobalto, agua potable y combustibles fósiles (Crawford, 2021). Asimismo, el emplazamiento de centros de datos masivos presiona la capacidad hídrica y las redes eléctricas locales, encareciendo bienes vitales para sostener el enfriamiento de los servidores corporativos; un fenómeno que hoy encuentra en el propio territorio estadounidense un fuerte rechazo por parte de diversos actores sociales, lo que a mediano plazo no descarta la posibilidad de trasladar estos centros a las periferias del Sur Global (Taft, 2026).

Referencias

Alphabet Inc. (2026). *Form 10-K: Annual report for the fiscal year ended December 31, 2025 (Q4 & Fiscal Year 2025) [Informe anual, Formulario 10-K]*. U.S. Securities y Exchange Commission / Alphabet Investor Relations. https://abc.xyz/investor/

Andrejevic, M. (2007). *iSpy: Surveillance and Power in the Interactive Era*. University Press of Kansas.

Bernard, J. (1978). *La concepción marxista del capital*. Editorial Villalar.

Bresciano, J. (2010). *La historiografía en el amanecer de la cultura digital: Innovaciones metodológicas, discursivas e institucionales*. Ediciones Cruz del Sur.

Christophers, B. (2020). *Rentier Capitalism: Who Owns the Economy, and Who Pays for It?* Verso.

CMSI. (2003). *Declaración de Principios. Construir la Sociedad de la Información: un desafío mundial para el nuevo milenio (Documento WSIS-03/GENEVA/DOC/4-S)*. Unión Internacional de Telecomunicaciones. https://www.itu.int/net/wsis/outcome/booklet/declaration_a-es.html

Condis, F., Bonfiglio, F., y Schoon, A. (2025). Las metamorfosis del capitalismo liberal y los desafíos de la era digital. *European Scientific Journal*, *21*(10), 80. https://www.imf.org/external/pubs/ft/fandd/spa/2015/06/pdf/basics.pdf

Crawford, K. (2021). *Atlas of AI: Power, Politics, and the Planetary Costs of Artificial Intelligence*. Yale University Press.

Dobb, M. (1972). *Estudios sobre el desarrollo del capitalismo (2.ª ed.)* [Obra original publicada en 1946]. Siglo XXI Editores.

Durand, C. (2021). *Tecnofeudalismo: Crítica de la economía digital (V. Goldstein, trad.)* [(Obra original publicada en 2020)]. Ediciones La Cebra / Kaxilda.

Floridi, L. (2002). What is the Philosophy of Information? *Metaphilosophy*, *33*(1-2), 123-145. https://doi.org/10.1111/1467-9973.00221

Hui, Y. (2016). *On the existence of digital objects (Prólogo de B. Stiegler)*. University of Minnesota Press.

Jahan, S., y Mahmud, A. (2015). ¿Qué es el capitalismo? *Finanzas & Desarrollo. Fondo Monetario Internacional*, *52*(2), 44-45. https://doi.org/https://www.imf.org/external/pubs/ft/fandd/spa/2015/06/pdf/basics.pdf

Mazzucato, M. (2021). *Misión economía: Una guía para cambiar el capitalismo*. Taurus.

Moulier, Y. (2011). *Cognitive Capitalism*. Polity Press.

Polanyi, K. (1989). *La gran transformación: Crítica del liberalismo económico (J. Varela y F. Álvarez-Uría, trads.)* [Obra original publicada en 1944]. La Piqueta.

Schwab, K. (2016). *The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond*. World Economic Forum. https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond/

Srnicek, N. (2018). *Capitalismo de plataformas (A. Giacometti, trad.)* Caja Negra Editora.

Taft, M. (2026). *Las neuronas del Anticristo: La furia política contra los centros de datos y la IA en Estados Unidos*. Wired en Español. https://es.wired.com/articulos/las-neuronas-del-anticristo-la-furia-politica-contra-los-centros-de-datos-y-la-ia-en-estados-unidos

TeleGeography. (2023). *The state of the network: 2023 edition*.

Varian, H. (2013). *Beyond big data*. School of Information, University of California, Berkeley. https://people.ischool.berkeley.edu/~hal/Papers/2013/BeyondBigDataPaperFINAL.pdf

Varoufakis, Y. (2024). *Tecnofeudalismo: El sigiloso sucesor del capitalismo*. Deusto.

Zuboff, S. (2020). *La era del capitalismo de la vigilancia: La lucha por un futuro humano frente a las nuevas fronteras del poder (A. S. Mosquera, trad.)* Paidós.

Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL)
Revista Electrónica Conocimiento Libre y Licenciamiento (CLIC), Mérida – Venezuela
ISSN: 2244-7423

Ciberseguridad y desarrollo nacional en Venezuela: Capacidades, vulnerabilidades y condiciones institucionales

Cibersegurança e desenvolvimento nacional na Venezuela: Capacidades, vulnerabilidades e condições institucionais

Cybersecurity and National Development in Venezuela: Capabilities, Vulnerabilities, and Institutional Conditions

Dennis Chirinos
Universidad Cecilio Acosta, Zulia, Venezuela
dennisch22@gmail.com

Fecha de recepción: 24/04/2026
Fecha de aceptación: 04/10/2026
Pág: 145 – 161
DOI: 10.5281/zenodo.23888405

Resumen

En este ensayo el enfoque estará puesto en la relación entre la ciberseguridad y el desarrollo nacional en Venezuela, especialmente en la brecha entre la creciente digitalización de procesos claves y la falta de medios suficientes para su protección. Como punto de partida del análisis es necesario señalar que el problema de la ciberseguridad no es puramente tecnológico, sino que también tiene una dimensión de gobernanza, gestión de riesgos y de talento. A partir de la literatura académica, marcos internacionales, estándares e informes de organizaciones multilaterales se analizará el estado de la infraestructura digital de Venezuela, las principales vulnerabilidades y la capacidad institucional para gestionarlas en términos de riesgo cibernético. Esta revisión nos permite definir algunos factores económicos, tecnológicos e institucionales que pueden ayudar a explicar estas limitaciones pues, es posible argumentar que, aunque la presencia de recursos y tecnologías es una condición importante la brecha de ciberseguridad tiene más que ver con la mala interacción entre ellos y el capital humano.

Esta obra está bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0.

De manera similar se analizan las implicaciones que podría generar el reforzar la seguridad cibernética para la continuidad de los servicios digitales, la confianza, la capacidad tecnológica y el desarrollo económico. Finalmente se propone un enfoque a través de la identificación de indicadores y áreas de investigación que incluyan el cierre del déficit de talento, las consecuencias económicas de los incidentes de seguridad cibernética y la institucionalización de las políticas de seguridad cibernética en Venezuela.

Palabras clave: ciberseguridad, desarrollo nacional, gestión del riesgo, infraestructura crítica, soberanía tecnológica.

Resumo

Neste ensaio, o foco recairá sobre a relação entre a cibersegurança e o desenvolvimento nacional na Venezuela e, especialmente, na lacuna entre a crescente digitalização de processos-chave e a falta de meios suficientes para a sua proteção. Como ponto de partida da análise, é necessário ressaltar que o problema da cibersegurança não é puramente tecnológico, mas também possui uma dimensão de governança, gestão de riscos e gestão de talentos. Com base na literatura acadêmica, em marcos internacionais, normas e relatórios de organizações multilaterais, será analisado o estado da infraestrutura digital da Venezuela, as principais vulnerabilidades e a capacidade institucional para gerenciá-las em termos de risco cibernético. Essa revisão permite definir alguns fatores econômicos, tecnológicos e institucionais que podem ajudar a explicar tais limitações, visto que é possível argumentar que, embora a presença de recursos e tecnologias seja uma condição importante, a lacuna de cibersegurança está mais relacionada à interação inadequada entre eles e o capital humano. De maneira semelhante, analisam-se as implicações que o reforço da segurança cibernética poderia gerar para a continuidade dos serviços digitais, a confiança, a capacidade tecnológica e o desenvolvimento econômico. Por fim, propõe-se uma abordagem centrada na identificação de indicadores e áreas de pesquisa que incluam a redução do déficit de talentos, as consequências econômicas dos incidentes de segurança cibernética e a institucionalização das políticas de segurança cibernética na Venezuela.

Palavras-chave: cibersegurança, desenvolvimento nacional, , gestão de riscos, infraestrutura crítica, soberania tecnológica.

Abstract

This essay focuses on the relationship between cybersecurity and national development in Venezuela, particularly the gap between the increasing digitization of key processes and the lack of adequate means to protect them. As a starting point for the analysis, it is essential to note that the cybersecurity issue is not purely technological; it also encompasses dimensions of governance, risk management, and talent. Drawing on academic literature, international frameworks, standards, and reports from multilateral organizations, the essay analyzes the state of Venezuela's digital infrastructure, key vulnerabilities, and the institutional capacity to manage them regarding cyber risk.This review allows for the identification of economic, technological, and institutional factors that help explain these limitations; indeed, while the availability of resources and technologies is a crucial prerequisite, the cybersecurity gap stems largely from the poor interaction between these elements and human capital.Similarly, the essay examines the potential implications of strengthening cybersecurity for digital service continuity, trust, technological capacity, and economic development. Finally, it proposes an approach based on identifying indicators and research areas—including addressing the talent deficit, the economic consequences of cybersecurity incidents, and the institutionalization of cybersecurity policies in Venezuela.

Keywords: cybersecurity, national development, risk management, critical infrastructure, technological sovereignty.

Introducción

La digitalización ha introducido cambios en el funcionamiento de los Estados, particularmente en los ámbitos donde las tecnologías digitales se han integrado a funciones críticas de la administración. Sistemas gubernamentales, plataformas financieras, infraestructuras de telecomunicaciones, servicios educativos y procesos productivos operan sobre entornos digitales interconectados, cuya disponibilidad incide en la continuidad institucional. En este escenario, la ciberseguridad -entendida de manera preliminar como el conjunto de medidas orientadas a proteger los activos digitales de las organizaciones y los usuarios (International Telecommunication Union, 2008) es tratada cada vez más como un asunto de gobernanza y de desarrollo, y no solo como una función técnica de las tecnologías de la información (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2022).

Diversos organismos internacionales advierten que la digitalización, además de favorecer la innovación y la eficiencia, amplía la superficie de ataque -el conjunto de puntos de un sistema por los que un agente no autorizado puede intentar ingresar, producir un efecto o extraer

datos (National Institute of Standards and Technology, 2026)- y los riesgos asociados a la interconexión de sistemas críticos. La Unión Internacional de Telecomunicaciones señala que algunos países han avanzado en conectividad y servicios digitales sin contar aún con muchas de las medidas de ciberseguridad, con el riesgo de un ciberespacio más inseguro para quienes ya están conectados (International Telecommunication Union, 2024).

En el ámbito nacional, la digitalización se ha descrito como un proceso fragmentado y desigual, condicionado por limitaciones de infraestructura, obsolescencia tecnológica y restricciones para adoptar estándares internacionales de ciberseguridad. Esta situación puede incrementar la vulnerabilidad del ecosistema digital venezolano frente a amenazas persistentes y coordinadas, tanto internas como externas, y afectar la continuidad de servicios digitales esenciales (Carrero, 2025).

Las explicaciones disponibles sobre esa vulnerabilidad no son unívocas. Algunas la atribuyen a restricciones económicas y tecnológicas; otras, a debilidades institucionales en la planificación y gestión del riesgo; otras, a la forma en que la ciberseguridad se encuadra como asunto de seguridad nacional, lectura asociada a la teoría de la securitización (Buzan et al., 1998; Carrero, 2025; Hansen y Nissenbaum, 2009). El ensayo se orienta por la siguiente pregunta: ¿Qué condiciones técnicas e institucionales explican la distancia entre la digitalización de los servicios esenciales en Venezuela y las capacidades disponibles para protegerlos? El ensayo sostiene, como tesis interpretativa apoyada en la literatura (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2015; Pascoe et al., 2024), que esa distancia responde menos a la falta de herramientas que a la ausencia de una gobernanza del riesgo que articule tecnología, institucionalidad y talento humano.

El análisis se basa en una lectura de la literatura especializada, las normas técnicas, los mecanismos de regulación internacional y los documentos de instituciones multilaterales. Considera las capacidades, las vulnerabilidades y las debilidades en la gestión de los riesgos cibernéticos dentro de Venezuela desde las perspectivas tecnológica, organizacional e institucional. Las afirmaciones relacionadas con Venezuela realizadas en el análisis son interpretativas debido al hecho de que el análisis se realiza utilizando materiales secundarios. Las categorías políticas principales como el Estado, la seguridad nacional, la securitización y el desarrollo nacional se determinan al comienzo del desarrollo con la ayuda de la bibliografía especializada.

Fundamentos conceptuales

La International Telecommunication Union (2008) define la ciberseguridad como el conjunto de herramientas, políticas, conceptos de seguridad, salvaguardas, directrices, enfoques de gestión del riesgo, acciones, formación, buenas prácticas, mecanismos de aseguramiento y tecnologías que pueden utilizarse para proteger los activos de la organización y de los

usuarios en el ciberespacio. En este ensayo, el ciberespacio designa el entorno resultante de la interconexión de sistemas, redes y servicios digitales. Los objetivos de seguridad que la definición busca preservar son la confidencialidad (acceso solo para quienes están autorizados), la integridad (la información no se altera sin autorización) y la disponibilidad (acceso oportuno a los sistemas y los datos). La definición incluye, además de la protección técnica, dimensiones organizacionales y de gestión del riesgo.

La gobernanza tecnológica es otro concepto necesario para el análisis. La Organisation for Economic Co-operation and Development (2015) plantea que la gestión del riesgo de seguridad digital debe integrarse en los procesos de decisión de las organizaciones, con el compromiso del más alto nivel de dirección, y recomienda a los gobiernos adoptar una estrategia nacional para ese fin. Desde este enfoque, la protección de los activos digitales depende tanto de capacidades operativas como de las estructuras de dirección y toma de decisiones que condicionan su implementación.

Según el National Institute of Standards and Technology (2018), que recoge la definición de la normativa estadounidense, las infraestructuras críticas son los sistemas y activos, físicos o virtuales, tan vitales que su incapacidad o destrucción tendría un efecto debilitante sobre la seguridad, la economía nacional, la salud o la seguridad públicas, o cualquier combinación de ellas. En este ensayo se adopta esa noción para el ámbito digital: las infraestructuras digitales críticas son aquellas que dependen de las tecnologías de la información y las comunicaciones, como las redes de telecomunicaciones, los sistemas financieros y las plataformas de gobierno electrónico.

En términos operativos, la ciberseguridad se organiza mediante capacidades técnicas, procesos organizativos y mecanismos de control orientados a resguardar los sistemas frente a amenazas que comprometen su confidencialidad, integridad y disponibilidad. Estas capacidades se vinculan con las infraestructuras críticas que sostienen funciones del Estado. Vergara (2024) plantea que la ciberseguridad es una condición para el funcionamiento seguro y confiable de las infraestructuras digitales críticas.

El *Global Cybersecurity Index* (GCI) de la International Telecommunication Union (2024) evalúa el compromiso de los países en cinco pilares: medidas legales, técnicas, organizativas, de desarrollo de capacidades y de cooperación. El índice concibe la ciberseguridad como un sistema y no como un conjunto de herramientas aisladas.

El *NIST Cybersecurity Framework 2.0* (CSF 2.0) incorpora la función "Gobernar" (*Govern*) junto con las funciones previas del marco, con lo que la gobernanza del riesgo cibernético pasa a ser un componente transversal. Según Pascoe et al. (2024), el marco vincula la gestión de la ciberseguridad con la toma de decisiones de la organización y no la limita a controles técnicos reactivos, es decir, aplicados una vez ocurrido el incidente.

El concepto de Estado requiere precisión. Siguiendo la tradición weberiana, el Estado puede definirse como la organización que reclama con éxito el monopolio de la coacción física legítima sobre un territorio (Weber, 2014). Desde la perspectiva latinoamericana de Oszlak y O'Donnell (1981), el Estado se examina por las políticas estatales, es decir, por las tomas de posición de sus instituciones frente a cuestiones socialmente problematizadas. Las dos definiciones no son idénticas: la primera destaca el monopolio de la coacción; la segunda, las capacidades y decisiones del Estado ante problemas concretos. Para el ámbito digital se adopta la segunda, porque permite preguntar qué cuestiones de seguridad digital se reconocen como problemas públicos, quién las gestiona y con qué capacidades.

La seguridad nacional y la securitización requieren igual precisión, porque la ciberseguridad suele discutirse bajo ese encuadre. Siguiendo a Buzan et al. (1998), la seguridad remite a la supervivencia de un objeto de referencia frente a amenazas existenciales; la securitización es el proceso por el cual un actor presenta un asunto como amenaza existencial que justifica medidas excepcionales, fuera de los procedimientos ordinarios de la política. Hansen y Nissenbaum (2009) aplican esta teoría al ámbito cibernético y destacan, entre otros rasgos, la tecnificación, es decir, el recurso a la autoridad técnica de los expertos para legitimar ese encuadre. En este ensayo, la seguridad nacional designa el conjunto de asuntos que el Estado reconoce como amenazas a su supervivencia o a su funcionamiento institucional y que trata con carácter prioritario.

El desarrollo nacional también exige una definición. Siguiendo a Sen (2000), el desarrollo es un proceso de ampliación de las libertades reales de las personas, que incluye las condiciones económicas, sociales e institucionales que las sustentan. En este ensayo, la relación entre ciberseguridad y desarrollo nacional se examina en esa clave: se pregunta en qué medida los servicios digitales confiables y las capacidades institucionales de protección forman parte de esas condiciones.

Aproximación a la ciberseguridad en Venezuela

Estado de la infraestructura digital y la ciberseguridad

La infraestructura digital venezolana ha sido descrita como heterogénea, por la coexistencia de sistemas heredados (tecnologías anteriores que siguen en operación), plataformas con distintos niveles de actualización y tecnologías con limitada interoperabilidad, entendida como la capacidad de dos o más sistemas de intercambiar información y de utilizar la información intercambiada (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1990). Esta fragmentación puede dificultar la aplicación de políticas de seguridad coherentes y la centralización de la gestión del riesgo cibernético (Carrero, 2025).

Esta descripción plantea una pregunta: ¿Las limitaciones observadas responden principalmente a restricciones económicas y tecnológicas, a debilidades institucionales en la planificación y gestión del riesgo digital, o a ambas? La evidencia disponible no permite decidirlo, y la literatura ofrece al menos tres lecturas. Una sostiene que el nivel de ciberseguridad depende de los recursos disponibles. Otra sostiene que depende de la capacidad de las organizaciones para integrar la seguridad en sus procesos de gobernanza y toma de decisiones (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2015; Pascoe et al., 2024). Una tercera, asociada a la teoría de la securitización, examina cómo el encuadre de la ciberseguridad como asunto de seguridad nacional condiciona qué problemas se priorizan y quién decide sobre ellos (Buzan et al., 1998; Carrero, 2025; Hansen y Nissenbaum, 2009).

Cada lectura implica un diagnóstico distinto y por lo tanto distintas medidas. Con la información de que se dispone el ensayo no puede resolver el debate desde una perspectiva empírica, pero si toma una postura sobre el asunto manteniendo que la lectura institucional es la más efectiva en el caso de Venezuela ya que el área de la gobernanza del riesgo (las directrices generales, la priorización de los sistemas claves y la educación del personal) es la que puede cambiar gradualmente incluso con recursos limitados. Una lectura basada en los recursos no deja mucho espacio para las acciones mientras que la securitización explica quién toma las decisiones, pero no cómo se construyen las capacidades de protección.

Según el GCI 2024 (International Telecommunication Union, 2024), Venezuela se ubica en el cuarto de los cinco niveles de desempeño (“en evolución”), con un puntaje de 40,5 sobre 100 según el reporte de país de Internet Society (2026), frente a un promedio global de 65,7. El índice mide compromisos y medidas adoptadas, no la seguridad efectiva de los sistemas, por lo que no permite inferir por sí solo el grado real de exposición. En términos técnicos, un desarrollo limitado de capacidades suele asociarse con monitoreo restringido, baja automatización de la respuesta a incidentes y detección tardía; sin embargo, las fuentes consultadas no documentan esa asociación para instituciones venezolanas específicas. Entre las capacidades que este tipo de índices considera figura el centro de respuesta a incidentes, es decir, el equipo encargado de recibir, analizar y responder a los eventos de seguridad (National Institute of Standards and Technology, 2026).

Las limitaciones descritas pueden aumentar la dependencia tecnológica externa y la exposición de las instituciones públicas y privadas a ataques que afecten la continuidad de servicios digitales esenciales. Una hipótesis que este ensayo plantea, y que requeriría contrastación empírica, es que la normalización de las limitaciones tecnológicas dentro de las prácticas institucionales interviene tanto como la falta de infraestructura. La convivencia de sistemas heredados con plataformas parcialmente actualizadas puede haber favorecido prácticas orientadas a garantizar la continuidad inmediata de los servicios, con la seguridad en un segundo plano.

Esa lógica es comprensible en contextos de restricción, pero profundiza la exposición a riesgos de carácter estructural, como la indisponibilidad de servicios digitales críticos, la pérdida de integridad de la información y la dependencia tecnológica externa. La International Telecommunication Union (2024) describe que muchos países de los niveles 3 y 4 del índice enfrentan brechas de capacidad por limitaciones de personal, equipamiento y financiamiento sostenido. Esa descripción general no sustituye la evidencia específica sobre las instituciones venezolanas.

Tipología de amenazas cibernéticas y vulnerabilidades técnicas

Un riesgo cibernético es una situación potencial que puede afectar la confidencialidad, integridad y disponibilidad de los sistemas digitales y la continuidad operativa de servicios esenciales. Una amenaza es el agente o evento que puede aprovechar una vulnerabilidad, y una vulnerabilidad es una debilidad en un sistema, procedimiento o control que puede ser explotada (National Institute of Standards and Technology, 2026). Entre los riesgos relevantes para el caso venezolano se cuentan la interrupción prolongada de plataformas digitales, el acceso no autorizado a información sensible, la alteración de datos institucionales y la pérdida de confianza en los entornos tecnológicos.

En este ensayo, "ecosistema digital venezolano" designa el conjunto de plataformas, infraestructuras y servicios digitales que sostienen funciones del Estado y de la vida social: portales web de organismos gubernamentales, sistemas de gestión administrativa y tributaria, plataformas de servicios públicos, sistemas financieros y bancarios, e infraestructuras de telecomunicaciones. Dada la interdependencia entre estos componentes, la afectación de uno de ellos puede tener efectos que exceden el ámbito tecnológico, incluida la confianza ciudadana en los entornos digitales.

Los informes regionales de seguridad reportan, para América Latina, un aumento de varios tipos de ataque (Assolini, 2023). Los ataques de denegación de servicio distribuido (DDoS) buscan saturar un servicio con tráfico para dejarlo indisponible; el *phishing* suplanta comunicaciones legítimas para obtener credenciales; el *ransomware* es un software malicioso que cifra la información y exige un pago para restituir el acceso, y su impacto es mayor en infraestructuras que carecen de respaldos de la información (National Institute of Standards and Technology, 2026). También se reportan ataques al sistema de nombres de dominio (DNS), que traduce los nombres de sitios web en direcciones de red (Mockapetris, 1987), y al enrutamiento mediante el protocolo de puerta de enlace de frontera (BGP), con el cual las redes intercambian información sobre las rutas del tráfico (Rekhter et al., 2006).

Estas amenazas suelen aprovechar vulnerabilidades recurrentes, como configuraciones inseguras, software sin parches de seguridad, autenticación débil y ausencia de monitoreo continuo. Misión Verdad (2024), medio de análisis político, sostiene que los ataques contra

infraestructuras estatales en Venezuela han aumentado en volumen y sofisticación. El medio recoge cifras oficiales según las cuales, al 12 de agosto de 2024, 25 instituciones habían sido atacadas y más de 40 casos estaban en investigación tras las elecciones presidenciales del 28 de julio. Esas afirmaciones no se contrastaron aquí con fuentes técnicas independientes, por lo que se toman como indicio y no como evidencia concluyente.

Un dato de naturaleza distinta es que, según la base de incidentes divulgados que analiza Vergara (2024), el 73 % de los incidentes divulgados en Venezuela entre 2014 y 2023 se atribuyen a motivos políticos; el dato se refiere solo a incidentes divulgados públicamente, y la fuente vincula, en términos generales, las diferencias entre países con las reglas de divulgación de cada uno.

La complejidad de las amenazas constituye únicamente un factor parcial en la determinación del grado de exposición institucional pues, concurren factores internos de relevancia, tales como infraestructuras tecnológicas con deficiencias en materia de actualización, insuficiencias en los procesos de vigilancia y débil incorporación de medidas preventivas. Estas circunstancias suscitan interrogantes fundamentales respecto de si las instituciones poseen la capacidad necesaria para prever escenarios desfavorables en contextos caracterizados por transformaciones continuas, así como cuáles son los elementos que condicionan tal capacidad: restricciones presupuestarias, disponibilidad de recursos humanos especializados o definiciones estratégicas en la gestión institucional. Actualmente, no se cuenta con información empírica concluyente específica al caso venezolano que permita resolver esta cuestión.

Desde el punto de vista técnico, cuando no existen procesos continuos de análisis de vulnerabilidades ni capacidades de correlación de eventos -el cruce de registros de distintos sistemas para identificar patrones que indiquen un incidente- ni de monitoreo integrado, se reduce la posibilidad de anticipar incidentes antes de que produzcan impactos mayores. Del mismo modo, los planes de contingencia y recuperación que se centran en respuestas reactivas dejan sin cubrir los esquemas preventivos y de continuidad operativa. La información pública sobre estas capacidades en instituciones venezolanas es limitada, por lo que esta descripción se toma como hipótesis de trabajo.

Soberanía tecnológica e infraestructuras críticas

La soberanía tecnológica es un concepto en disputa. Couture y Toupin (2019) muestran que la noción de soberanía aplicada a lo digital se emplea para describir formas de independencia, control y autonomía sobre infraestructuras, tecnologías y datos, pero que sus sujetos (Estados, comunidades, colectivos) y sus definiciones varían de manera significativa. Floridi (2020), al analizar el caso europeo, la discute como la capacidad de controlar los datos, el software, los estándares, los protocolos, el hardware y los servicios digitales de los que depende una entidad. En este ensayo se adopta una definición operativa: la capacidad de un Estado de participar

de manera autónoma e informada en las decisiones sobre la adopción, gestión y control de las tecnologías que considera prioritarias para su funcionamiento. Esta capacidad no equivale a aislamiento frente al ecosistema digital global; remite a las capacidades institucionales para reducir dependencias críticas.

Torres (2023) vincula la ciberseguridad con la soberanía tecnológica. Según este enfoque, proteger los activos digitales críticos supone conservar capacidad de control, auditoría y decisión sobre las infraestructuras que soportan funciones esenciales del país. Esta relación es objeto de debate, pues una mayor autonomía puede entrar en tensión con el uso de tecnologías y proveedores externos que, a su vez, pueden ofrecer mayores niveles de protección técnica. La norma ISO/IEC 27001 (International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission, 2022), que establece requisitos para los sistemas de gestión de seguridad de la información, y el NIST CSF 2.0 (Pascoe et al., 2024) son marcos de gestión del riesgo alineados con prácticas internacionales. Su adopción puede facilitar esa gestión sin recurrir al aislamiento del ecosistema global (Pascoe et al., 2024).

Talento humano, automatización e innovación tecnológica

La disponibilidad de talento humano especializado es una de las limitaciones más señaladas en ciberseguridad. Las funciones de análisis de amenazas, respuesta a incidentes, seguridad en la nube, inteligencia artificial aplicada y análisis forense digital (la recolección y el examen de evidencia digital tras un incidente) requieren perfiles técnicos específicos (Vergara, 2024).

El déficit global de profesionales de ciberseguridad, con más de cuatro millones de puestos sin cubrir en 2023, afecta de manera particular a los sectores gubernamentales no militares, a las pequeñas y medianas empresas y a los países en desarrollo (Vergara, 2024). A nivel nacional, esta brecha se ha asociado con limitaciones en el mantenimiento técnico de las infraestructuras digitales y en la capacidad de respuesta ante incidentes complejos (Carrero, 2025).

La Organisation for Economic Co-operation and Development (2024) define un sistema de Inteligencia Artificial (IA) como un sistema basado en máquinas que, para objetivos explícitos o implícitos, infiere a partir de los datos de entrada que recibe cómo generar resultados, tales como predicciones, contenidos, recomendaciones o decisiones, capaces de influir en entornos físicos o virtuales; los sistemas de IA varían en sus niveles de autonomía y adaptabilidad tras su despliegue. Esta tecnología se ha incorporado a actividades de detección de anomalías, monitoreo de redes y análisis de eventos de seguridad, de forma complementaria a los mecanismos tradicionales de protección digital.

La automatización de procesos de seguridad, entendida como la ejecución de tareas de detección y respuesta con intervención humana mínima, el uso de IA para la detección de amenazas y la formación técnica especializada son líneas de acción discutidas en la literatura

para mejorar la capacidad de respuesta de las organizaciones frente a riesgos cibernéticos. Las causas de la brecha de talento especializado no se agotan en la oferta de formación académica. Intervienen las oportunidades de desarrollo profesional, las condiciones laborales y la capacidad de las instituciones para retener personal calificado. Este ensayo no dispone de datos propios sobre estos factores en Venezuela; su peso relativo requiere investigación empírica.

La discusión sobre la ciberseguridad nacional suele concentrarse en la adopción de tecnologías, herramientas o marcos normativos, y menos en las dinámicas humanas que condicionan su aplicación. La disponibilidad técnica, por sí sola, no mejora la seguridad si no se acompaña de procesos formativos continuos y de condiciones que permitan a las organizaciones apropiarse de esas capacidades.

La hipótesis que se plantea aquí es que, sin formación especializada continua y sin condiciones que favorezcan la permanencia del personal técnico, las soluciones tecnológicas tienden a quedar en prácticas operativas fragmentadas. Según esta hipótesis, la brecha de talento sería tanto un déficit cuantitativo como una limitación estructural para la eficacia de las iniciativas de seguridad digital. Vergara (2024) sostiene que el aspecto técnico, aunque importante, no es el único factor ni necesariamente el principal para entender por qué los sistemas son atacados de forma constante.

Implicaciones del fortalecimiento de la ciberseguridad para el desarrollo nacional

Además de las vulnerabilidades y amenazas, la literatura examina los efectos de integrar la ciberseguridad al desarrollo nacional. Se sostiene que fortalecer la seguridad digital reduce riesgos y puede contribuir a la expansión de la economía digital, la innovación tecnológica y la confianza en los servicios basados en plataformas digitales (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2022; Vergara, 2024). Estas relaciones se plantean como posibles y dependientes del contexto; no están establecidas como causales para el caso venezolano. En el plano interno, la ciberseguridad puede contribuir a la disponibilidad y estabilidad de los servicios digitales de la administración pública, el sector financiero y las telecomunicaciones, que son condiciones para las actividades económicas, la digitalización de trámites y la prestación de servicios sobre plataformas tecnológicas. Su alcance no se limita a la protección frente a amenazas: también incide en las condiciones de funcionamiento que sostienen la confianza de usuarios e instituciones en estos entornos.

El fortalecimiento de la ciberseguridad también se asocia con el desarrollo de capacidades tecnológicas locales. Vergara (2024) recomienda a los países en desarrollo promover una industria nacional de ciberseguridad, un plan de investigación y desarrollo ajustado a sus necesidades y programas de concientización y formación. Como hipótesis de este ensayo, tales medidas podrían reducir dependencias externas de largo plazo, aunque la fuente no lo

establece para el caso venezolano. En este proceso podrían participar universidades y centros de formación, mediante capacitación técnica orientada a necesidades del entorno digital nacional.

La ciberseguridad tiene además una dimensión económica que, según Vergara (2024), las pérdidas indirectas de los incidentes cibernéticos son más difíciles de observar, pero en conjunto mayores que las directas, y operan por canales como las interrupciones en la cadena de producción, el daño reputacional y la erosión de la confianza en los servicios digitales. La misma autora estima que un país en desarrollo que pasara, en una década, del cuartil superior al inferior en número de incidentes graves divulgados podría aumentar su producto interno bruto per cápita en torno a 1,5 %. Reducir las interrupciones y la gestión reactiva de incidentes puede disminuir esos costos.

La gestión de riesgos digitales puede impulsar la revisión de procesos, la modernización de arquitecturas tecnológicas y la adopción de enfoques integrales de gestión del riesgo. Consecuentemente, la guía de International Telecommunication Union, World Bank, NATO Cooperative Cyber Defence Centre of Excellence y partners (2025) plantea la ciberseguridad como prerrequisito de la transformación digital y del desarrollo socioeconómico: sin protección y confianza, la infraestructura y los servicios digitales no generan valor público duradero.

Una lectura centrada solo en el riesgo y la amenaza deja de lado estos posibles efectos; una lectura centrada solo en los beneficios, a su vez, puede subestimar los costos de implementación. En este ensayo, fortalecer la seguridad digital se entiende como la construcción de condiciones para una inserción más estable en la economía digital internacional, al tiempo que se reducen vulnerabilidades y se preservan los esquemas de cooperación propios del ecosistema digital.

Líneas de acción para el fortalecimiento de la ciberseguridad en Venezuela

Las políticas públicas pueden definirse como cursos de acción y flujos de información relacionados con un objetivo público definido de forma democrática, desarrollados por el sector público y, con frecuencia, con participación de la comunidad y del sector privado (Lahera, 2004). Aguilar (2009) las concibe como procesos de decisión y actuación mediante los cuales el Estado interviene para orientar la atención de asuntos de interés colectivo. Desde esta perspectiva, la gestión de la ciberseguridad puede analizarse como una política pública transversal, porque involucra decisiones sobre regulación, desarrollo de capacidades, protección de infraestructuras críticas y coordinación institucional. En este marco, una estrategia nacional de ciberseguridad es el documento de política pública que fija los objetivos, prioridades, responsabilidades y mecanismos de coordinación del Estado en la materia (International Telecommunication Union, World Bank, NATO Cooperative Cyber Defence Centre of Excellence y partners, 2025).

Las debilidades de la infraestructura digital y de la gestión del riesgo cibernético descritas

sugieren que el desafío no se limita a las amenazas externas, sino que incluye la falta de enfoques sostenidos que articulen tecnología, gobernanza y capacidades humanas. Los organismos internacionales recomiendan para las economías en desarrollo medidas graduales, acordes con las condiciones económicas y operativas de cada país (International Telecommunication Union, World Bank, NATO Cooperative Cyber Defence Centre of Excellence y partners, 2025; Vergara, 2024).

Persiste una pregunta de fondo: ¿Por qué las capacidades de ciberseguridad avanzan más lentamente que la digitalización? Una explicación frecuente en la literatura es que los servicios digitales se expanden con mayor rapidez que los mecanismos de protección y gobernanza, lo que genera brechas de exposición al riesgo. Otra posible explicación es que la seguridad compita con otras prioridades en la asignación de recursos y atención de las instituciones. Las dos explicaciones no son excluyentes, y su verificación en el caso venezolano requeriría datos primarios sobre las instituciones venezolanas.

Diversos marcos internacionales de gestión del riesgo, entre ellos el NIST Cybersecurity Framework 2.0, consideran que la adopción de lineamientos técnicos comunes favorece la coherencia operativa entre organizaciones y facilita la gestión de incidentes de seguridad. En contextos caracterizados por la coexistencia de plataformas heterogéneas, esta aproximación ha sido utilizada como mecanismo para reducir la fragmentación tecnológica y establecer criterios compartidos de control de accesos, respaldo de información y respuesta ante incidentes (Pascoe et al., 2024).

La literatura sobre estrategias nacionales de ciberseguridad señala que los países con capacidades limitadas suelen priorizar la protección de aquellas infraestructuras cuyo fallo tendría mayores repercusiones económicas y sociales. Este enfoque de priorización se observa en diversas guías internacionales orientadas a la gestión gradual del riesgo digital (International Telecommunication Union, World Bank, NATO Cooperative Cyber Defence Centre of Excellence y partners, 2025).

Las tecnologías abiertas y auditables, es decir, aquellas cuyo código o especificaciones pueden ser inspeccionados por terceros, pueden ser una alternativa para fortalecer la seguridad digital sin aumentar de forma significativa los costos operativos. Dadas las restricciones presupuestarias y la dependencia tecnológica externa atribuidas al país, plataformas abiertas para monitoreo, análisis de tráfico o gestión de incidentes podrían ampliar la autonomía técnica, facilitar la auditoría y fortalecer capacidades locales. Su adopción tiene también costos propios, como los de mantenimiento y capacitación, que deben evaluarse.

Otro aspecto discutido en la literatura corresponde a la implementación de esquemas de monitoreo y detección centralizados, inicialmente de alcance limitado. El GCI incluye entre sus medidas técnicas la existencia de equipos nacionales de respuesta a incidentes: según el

informe, 139 de los 194 países evaluados cuentan con uno (International Telecommunication Union, 2024). Las fuentes consultadas no permiten determinar el alcance de la función de monitoreo y detección en las instituciones venezolanas.

El factor humano es otro eje de las medidas propuestas. En Venezuela, la escasez de profesionales especializados en ciberseguridad se ha señalado como limitación para la operación y el mantenimiento de las infraestructuras digitales (Carrero, 2025). La falta de personal capacitado puede aumentar los tiempos de recuperación ante incidentes y los costos de los fallos tecnológicos. Vergara (2024) y la Agencia de la Unión Europea para la Ciberseguridad (European Union Agency for Cybersecurity, 2024), esta última con referencia al contexto europeo, destacan la formación técnica especializada, las certificaciones profesionales y la vinculación entre universidades e instituciones públicas como componentes del fortalecimiento de capacidades.

Los indicadores de tiempo de la Tabla 1 se entienden así: el tiempo de detección es el intervalo entre el inicio de un incidente y su identificación; el tiempo de respuesta, el intervalo entre su identificación y la aplicación de acciones de contención; y el tiempo de recuperación, el intervalo hasta restablecer la operación del servicio afectado.

Tabla 1: Indicadores propuestos para el seguimiento de las líneas de acción en ciberseguridad en Venezuela

Dimensión	**Línea de acción asociada**	**Indicadores de seguimiento propuestos**
Gobernanza tecnológica	Lineamientos técnicos comunes	Existencia de marco técnico; coordinación interinstitucional.
Infraestructuras críticas digitales	Priorización de sistemas críticos	Disponibilidad operativa; tiempo de recuperación.
Capacidad técnica operativa	Monitoreo y detección de incidentes	Tiempo de detección; tiempo de respuesta.
Talento humano especializado	Formación y retención	Programas activos; permanencia del talento.
Impacto económico y desarrollo digital	Continuidad y confianza de servicios digitales	Interrupciones con impacto económico.

Fuente: Elaboración propia (2026).

La selección de los indicadores se basa en enfoques que conciben la ciberseguridad como gestión del riesgo y fortalecimiento de capacidades, y no como ausencia de incidentes (International Telecommunication Union, 2024; Pascoe et al., 2024). Estos enfoques consideran la gobernanza, la protección de infraestructuras críticas, la capacidad operativa y el desarrollo del talento humano como dimensiones de evaluación. Los indicadores no buscan establecer comparaciones con contextos de alto desarrollo tecnológico, sino dar seguimiento a cambios

graduales coherentes con las condiciones estructurales del país. La Tabla 1 es una propuesta de elaboración propia: no ha sido validada empíricamente y no incluye metas ni línea base.

Conclusiones

En primer lugar, la ciberseguridad se vincula con dimensiones técnicas, organizacionales, normativas y humanas, y no exclusivamente con la protección de sistemas digitales. En el caso de Venezuela, la fragmentación tecnológica, las limitaciones en la gestión del riesgo y las dificultades para formar y retener talento especializado aparecen asociadas a una mayor exposición de la continuidad de los servicios digitales.

Las explicaciones existentes sobre estas limitaciones incluyen factores económicos, tecnológicos e institucionales, así como distintas formas de comprender la ciberseguridad dentro de la agenda pública. Al respecto, se sostiene que la lectura institucional es la más productiva para orientar medidas. Asimismo, la literatura revisada indica que el fortalecimiento de la ciberseguridad requiere la articulación de capacidades tecnológicas, mecanismos de gobernanza y procesos continuos de formación especializada.

Finalmente, se presenta una propuesta de indicadores de seguimiento orientada al análisis de capacidades nacionales en materia de ciberseguridad, cuya utilidad requiere validación empírica. De este modo, permanecen abiertas líneas de investigación relacionadas con la brecha de talento, los efectos económicos de los incidentes cibernéticos y la configuración institucional de las políticas de ciberseguridad en el país.

Referencias

Aguilar, L. (2009). Marco para el análisis de las políticas públicas. *Administración y Desarrollo*, *37*(51), 11-28.

Assolini, F. (2023). *Panorama de amenazas en América Latina 2023*. Kaspersky. https://latam.kaspersky.com/blog/panorama-amenazas-latam-2023/

Buzan, B., Wæver, O., y De Wilde, J. (1998). *Security: A new framework for analysis*. Lynne Rienner Publishers.

Carrero, T. (2025). La securitización de la ciberseguridad en Venezuela: Dilemas para la seguridad nacional. *Revista Científica Multidisciplinaria*, *11*(1), 395-409.

Couture, S., y Toupin, S. (2019). What does the notion of "sovereignty" mean when referring to the digital? *New Media & Society*, *21*(10), 2305-2322. https://doi.org/10.1177/1461444819865984

European Union Agency for Cybersecurity. (2024). *2024 report on the state of cybersecurity in the Union*. ENISA. https://www.enisa.europa.eu/publications/2024-report-on-the-state-of-the-cybersecurity-in-the-union

Floridi, L. (2020). The Fight for Digital Sovereignty: What It Is, and Why It Matters, Especially for the EU. *Philosophy & Technology*, *33*, 369-378. https://doi.org/10.1007/s13347-020-00423-6

Hansen, L., y Nissenbaum, H. (2009). Digital disaster, cyber security, and the Copenhagen School. *International Studies Quarterly*, *53*(4), 1155-1175. https://doi.org/10.1111/j.1468-2478.2009.00572.x

Institute of Electrical and Electronics Engineers. (1990). IEEE standard glossary of software engineering terminology (IEEE Std 610.12-1990). *IEEE Xplore*, *53*(4), 1155-1175. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1990.101064

International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (2022). *ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection — Information security management systems — Requirements*. ISO. https://www.iso.org/es/norma/27001

International Telecommunication Union. (2008). *Overview of cybersecurity (Recommendation ITU-T X.1205)*. ITU. https://www.itu.int/rec/T-REC-X.1205-200804-I

International Telecommunication Union. (2024). *Global Cybersecurity Index 2024 (5th ed.)* ITU. https://www.itu.int/en/ITU-D/Cybersecurity/Pages/Global-Cybersecurity-Index.aspx

International Telecommunication Union, World Bank, NATO Cooperative Cyber Defence Centre of Excellence y partners. (2025). *Guide to developing a national cybersecurity strategy (3rd ed.)* ITU. https://www.itu.int/pub/D-STR-CYB_GUIDE.03-2025

Internet Society. (2026). *Internet Society Pulse: Venezuela [Reporte de país]*. https://pulse.internetsociety.org/en/reports/VE/

Lahera, E. (2004). *Política y políticas públicas (Serie Políticas Sociales, No. 95)*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Misión Verdad. (2024). *Ciberataques contra Venezuela: Alcances y dimensiones técnicas*. https://misionverdad.com/venezuela/ciberataques-contra-venezuela-sus-alcances-y-dimensiones-tecnicas

Mockapetris, P. (1987). *Domain names — Concepts and facilities (RFC 1034)*. Internet Engineering Task Force. https://www.rfc-editor.org/info/rfc1034

National Institute of Standards and Technology. (2018). *Framework for Improving Critical Infrastructure Cybersecurity (Version 1.1)*. U.S. Department of Commerce. https://doi.org/10.6028/NIST.CSWP.04162018

National Institute of Standards and Technology. (2026). *Computer Security Resource Center glossary*. U.S. Department of Commerce. https://csrc.nist.gov/glossary

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2015). *Recommendation of the Council on Digital Security Risk Management for Economic and Social Prosperity (OECD/LEGAL/0415)*. OECD Publishing. https://legalinstruments.oecd.org/public/doc/328/328.en.pdf

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2022). *OECD Policy Framework on Digital Security*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/a69df866-en

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2024). *Explanatory memorandum on the updated OECD definition of an AI system (OECD Artificial Intelligence Papers, No. 8)*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/623da898-en

Oszlak, O., y O'Donnell, G. (1981). *Estado y políticas estatales en América Latina: Hacia una estrategia de investigación (Documento G.E. CLACSO, n.º 4)*. CEDES.

Pascoe, C., Quinn, S., y Scarfone, K. (2024). *The NIST Cybersecurity Framework (CSF) 2.0 (NIST CSWP 29)*. National Institute of Standards; Technology. https://doi.org/10.6028/NIST.CSWP.29

Rekhter, Y., Li, T., y Hares, S. (2006). *A border gateway protocol 4 (BGP-4) (RFC 4271)*. Internet Engineering Task Force. https://www.rfc-editor.org/info/rfc4271

Sen, A. (2000). *Desarrollo y libertad* [Obra original publicada en 1999]. Planeta.

Torres, D. (2023). *Ciberseguridad y ciberdefensa en Venezuela: Un enfoque sistémico*. Universidad Central de Venezuela.

Vergara, E. (2024). *Cybersecurity economics for emerging markets*. World Bank. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-2120-2

Weber, M. (2014). *Economía y sociedad: Esbozo de sociología comprensiva* [Obra original publicada en 1922]. Fondo de Cultura Económica.

Dialógica del Cosmos: Orden y caos en la génesis del Sistema Solar

Dialógica do Cosmos: Ordem e caos na gênese do Sistema Solar

Dialogics of the Cosmos: Order and Chaos in the Genesis of the Solar System

Giuliat Navas [1]
Walter Espinoza [2]
Centro de Investigaciones de Astronomía y Tecnologías Aplicadas Francisco J. Duarte, Mérida, Venezuela[1,2]
Universidad Politécnica Territorial de Mérida Kleber Ramírez, Mérida, Venezuela[1,2]
giuliatnavas@gmail.com[1]
wespinoza@uptm.edu.ve[2]

Fecha de recepción: 02/08/2026
Fecha de aceptación: 21/10/2026
Pág: 162 – 176
DOI: 10.5281/zenodo.23888452

Resumen

El presente ensayo interpreta la formación, evolución y estabilidad dinámica del Sistema Solar desde el pensamiento complejo de Edgar Morin, desafiando el paradigma reduccionista de la ciencia tradicional que tiende a la simplificación de la realidad cósmica. Se analiza la arquitectura planetaria de nuestro Sistema Solar como una entidad inherentemente compleja, definida por la dialógica entre el orden y el desorden. Lejos de ser un proceso exclusivamente determinista gobernado por la gravedad que ejerce el Sol sobre todos los cuerpos, la génesis y la configuración de nuestro Sistema Solar dependieron de la irrupción de eventos caóticos y contingentes que se vienen suscitando desde hace 4600 millones de años, tales como la onda de choque inicial de la nube molecular, el aplanamiento de la materia en un disco protoplanetario, la segregación de los planetas rocosos y gaseosos, la migración de los planetas gigantes descrita por el modelo de NIZA y las colisiones de gran impacto.

Esta obra está bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0.

A través del principio de recursividad organizacional, se examina cómo el Sistema Solar se auto-organiza en un bucle autoconstitutivo donde las perturbaciones dinámicas de los cuerpos más masivos, devienen en las causas de su propia metaestabilidad orbital. Finalmente, se aborda la clasificación de Plutón por la Unión Astronómica Internacional (IAU) como una metáfora epistemológica fundamental, ilustrándose las tensiones entre la necesidad racional de la ciencia de encasillar el cosmos en categorías simplificadoras y rígidas, y la naturaleza fluida, desconocida e impredecible de un universo observable e interconectado que desborda las certezas absolutas de la realidad.

Palabras clave: complejidad, Plutón, principio dialógico, recursividad organizacional, sistema solar.

Resumo

O presente ensaio interpreta a formação, a evolução e a estabilidade dinâmica do Sistema Solar a partir do pensamento complexo de Edgar Morin, desafiando o paradigma reducionista da ciência tradicional, que tende à simplificação da realidade cósmica. Analisa-se a arquitetura planetária do nosso Sistema Solar como uma entidade inerentemente complexa, definida pela dialógica entre a ordem e a desordem. Longe de ser um processo exclusivamente determinista, regido pela gravidade que o Sol exerce sobre todos os corpos, a gênese e a configuração do nosso Sistema Solar dependeram da irrupção de eventos caóticos e contingentes que vêm ocorrendo há 4,6 bilhões de anos — tais como a onda de choque inicial na nuvem molecular, o achatamento da matéria em um disco protoplanetário, a segregação entre planetas rochosos e gasosos, a migração dos planetas gigantes (descrita pelo modelo de Nice) e colisões de grande impacto. Por meio do princípio da recursividade organizacional, examina-se como o Sistema Solar se auto-organiza em um ciclo autoconstitutivo, no qual as perturbações dinâmicas causadas pelos corpos de maior massa tornam-se, por sua vez, as causas de sua própria metaestabilidade orbital. Por fim, aborda-se a classificação de Plutão pela União Astronômica Internacional (UAI) como uma metáfora epistemológica fundamental, ilustrando as tensões entre a necessidade racional da ciência de enquadrar o cosmos em categorias simplificadoras e rígidas, e a natureza fluida, desconhecida e imprevisível de um universo observável e interconectado, que transcende as certezas absolutas da realidade.

Palavras-chave: complexidade, Plutão, princípio dialógico, recursividade organizacional, sistema solar.

Abstract

This essay interprets the formation, evolution, and dynamic stability of the Solar System through Edgar Morin's complex thought, challenging the reductionist paradigm of traditional science that tends to simplify cosmic reality. The planetary architecture of our Solar System is analyzed as an inherently complex entity, defined by the dialogic relationship between order and disorder. Far from being an exclusively deterministic process governed by the gravity exerted by the Sun on all bodies, the genesis and configuration of our Solar System depended on the irruption of chaotic and contingent events that have been unfolding for 4.6 billion years, such as the initial shockwave of the molecular cloud, the flattening of matter into a protoplanetary disk, the segregation of rocky and gaseous planets, the migration of giant planets described by the Nice model, and high-impact collisions. Through the principle of organizational recursiveness, this paper examines how the Solar System self-organizes into a self-constituting loop where the dynamic perturbations of the most massive bodies become the causes of its own orbital metastability. Finally, the classification of Pluto by the International Astronomical Union (IAU) is addressed as a fundamental epistemological metaphor, illustrating the tensions between science's rational need to pigeonhole the cosmos into rigid, simplifying categories, and the fluid, unknown, and unpredictable nature of an observable and interconnected universe that overflows the absolute certainty of reality.

Keywords: complexity, Pluto, dialogic principle, organizational recursiveness, solar system.

Introducción

La ciencia moderna se ha edificado históricamente sobre el paradigma de la simplificación y el reduccionismo, buscando aislar los fenómenos para comprenderlos bajo leyes causales y deterministas (Morin, 1994). Sin embargo, esta herencia metodológica es evidente en la astronomía y en el estudio del Sistema Solar. Al observar la vastedad y la dinámica del cosmos, desde la formación de una estrella hasta la aparición de la conciencia en nuestro planeta, la realidad se impone como inherentemente compleja. Este ensayo adopta la visión epistemológica de Edgar Morin, quien sostiene que la complejidad no es solo la dificultad de comprensión, sino una cualidad intrínseca de los sistemas donde el orden y el desorden son inseparables. Esta dualidad es la base para entender lo racional e irracional de nuestro Sistema Solar, su composición y el comportamiento de sus cuerpos (Morin, 1986).

Para trascender la visión del universo como una máquina celeste predecible, el análisis se centra en la génesis de la formación, evolución y estabilidad dinámica de nuestro sistema

planetario, a través del principio dialógico. Si bien el modelo nebular ofrece una explicación racional y ordenada donde la gravedad y el momento angular crearon al Sol y al disco protoplanetario (Williams y Cieza, 2011). Esta narrativa científica pudiese estar incompleta, ya que el orden observado actualmente en la diferenciación de los planetas rocosos y gigantes gaseosos no se opone al caos, sino que lo contiene en potencia, permitiendo pensar que la formación planetaria en el sistema revela una manifestación de auto-organización cósmica, donde las leyes físicas y la contingencia coexisten, demostrando que el orden y el desorden son fuerzas que dialogan constantemente para generar la realidad observada (Morin, 1981).

La configuración y el movimiento de los astros en nuestro Sistema Solar y su estabilidad aparente pueden explicarse a través del principio de recursividad organizacional. Como lo señalan Morbidelli y Raymond (2016), la arquitectura planetaria contemporánea es un estado final homeostático que emergió de la auto-organización de su propio caos y desorden inicial, gracias a sus interacciones gravitacionales extremas. En efecto, el Sistema Solar primitivo era un sistema dinámico y caótico, que alcanzó la estabilidad a través del caos y de la reestructuración violenta postulada por el Modelo de Niza (Nesvorný, 2018). El motor de esta transición fue la migración de los planetas gigantes gaseosos, el cruce de Júpiter y Saturno, por una resonancia orbital crítica desestabilizó el sistema primigenio, impulsando a los planetas Urano y Neptuno hacia las regiones más exteriores del sistema. Este desplazamiento dispersó un denso disco de planetesimales helados, lo que dio origen al Cinturón de Kuiper, e indujo un intenso bombardeo en el Sistema Solar interior. Paradójicamente, esta catástrofe dinámica purgó el desorden remanente del medio interplanetario, forjando la estabilidad orbital que observamos en la actualidad.

Este proceso demuestra que el Sistema Solar retroactúa con los diversos cuerpos que lo integran (planetas, planetas enanos, satélites, asteroides, cometas, regiones transneptunianas, medio interplanetario, etc.). Éstos, al dispersar o capturar material, redefinen continuamente los límites dinámicos de todo el sistema. Esta recursividad constituye un bucle autoconstitutivo donde cada perturbación se convierte en una nueva causa, sentando así las bases de la estabilidad orbital requerida para el florecimiento de la vida. El planeta Tierra constituye un componente sistémico fundamental que integra y procesa las tensiones evolutivas del Sistema Solar, de manera que debió articular tanto el orden cósmico (la distancia racional en la zona de habitabilidad) como la contingencia (composición irracional, ejemplificada por el caos del impacto lunar que generó el campo magnético) para que se convirtiera en la manifestación del equilibrio entre la ley y el azar.

A lo largo de este ensayo, se argumentará que la formación y la evolución del Sistema Solar constituyen la precondición material indispensable para el florecimiento de la vida. El recorrido se iniciará abordando y analizando la génesis nebular y el origen de la Luna bajo el principio dialógico, donde el desorden y las colisiones catastróficas actúan como condiciones de posibilidad para el orden físico. Posteriormente, se examinará cómo la estabilidad metaestable

del sistema actual emergió de la auto-organización y la recursividad de los planetas gigantes, permitiendo que la Tierra se consolidara como una parte holográmica que inscribe y resuelve las tensiones de todo el conjunto cósmico. Finalmente, el análisis culminará abordando la polémica reclasificación de Plutón como una potente metáfora filosófica sobre los riesgos del pensamiento simplificador que, en su afán de categorizar la naturaleza, se expone a reducirla (Morin, 1994). En esencia, este trabajo articula una epistemología transdisciplinar orientada a demostrar que la existencia humana en nuestro planeta es, al mismo tiempo, el producto derivado y el reflejo consciente de la complejidad del cosmos.

La formación del Sistema Solar bajo el principio dialógico (orden y desorden)

El proceso de génesis de nuestro sistema planetario, el Sistema Solar se remonta a hace aproximadamente 4600 millones de años, a partir del colapso gravitacional de una nube molecular gigante de gas y polvo, dando lugar al Modelo Nebular (Williams y Cieza, 2011). Este modelo se apoya en un marco racional, donde las leyes físicas, especialmente la gravedad, actuaron y actúan como fuerzas organizadoras del sistema. Según este paradigma, el colapso de la nube molecular, la conservación del momento angular y la diferenciación térmica explican el orden mecánico y químico de nuestro Sistema Solar, partiendo desde el aplanamiento del disco protoplanetario, hasta la segregación entre planetas rocosos internos y gigantes gaseosos externos (Morbidelli y Raymond, 2016) (Fig. 1).

Esta descripción constituye una evidencia empírica de una racionalidad cósmica, un orden regido por leyes deterministas. Este evento externo, aleatorio y contingente producto del caos de la nube molecular gigante, representa el desorden necesario en el cosmos para activar el orden en nuestro sistema. Sin esa perturbación, la nube molecular pudo haber permanecido estable durante millones de años y no se hubiese formado nuestro Sistema Solar, ni el planeta en el que hoy vivimos. De manera que aquí se halla manifestada la lógica de Morin, en la que el desorden es la condición de posibilidad del orden. La génesis del Sistema Solar comenzó entonces, con una irrupción caótica que desencadenó una secuencia ordenada de eventos físicos.

La formación del Sistema Solar comenzó con un evento de desorden inicial (colapso gravitacional de una vasta nube molecular). Este colapso, aunque caótico, fue la chispa que activó un proceso de orden racional gobernado especialmente por la gravedad. Este orden se manifestó en el aplanamiento de la materia en un disco protoplanetario para la segregación de los planetas rocosos y gaseosos en su configuración actual (Figura 1). No obstante, esta narrativa no logra agotar la complejidad del fenómeno, tal como lo plantea Morin, la complejidad no excluye la racionalidad, pero la desborda. La génesis del Sistema Solar, desde esta perspectiva, puede entenderse como una danza dialógica entre lo racional (las leyes físicas) y lo incierto (la contingencia del sistema). El disparo caótico del proceso, provocado probablemente por la onda de choque de una supernova cercana (estrella gigante que explotó), representa el

desorden necesario que activó el orden gravitacional (Prigogine y Stengers, 1984). Este impacto comprimió la nube de gas y polvo interestelar (que flotaba en el espacio), permitiendo que la gravedad entrara en acción y comenzara a agrupar la materia de forma ordenada hasta formar al Sol (en el centro del sistema) y a los planetas orbitando a su alrededor. Fue a partir de ese desorden inicial que se configuró el sistema planetario actual, donde la Tierra emergió con las condiciones excepcionales que hacen posible la vida.

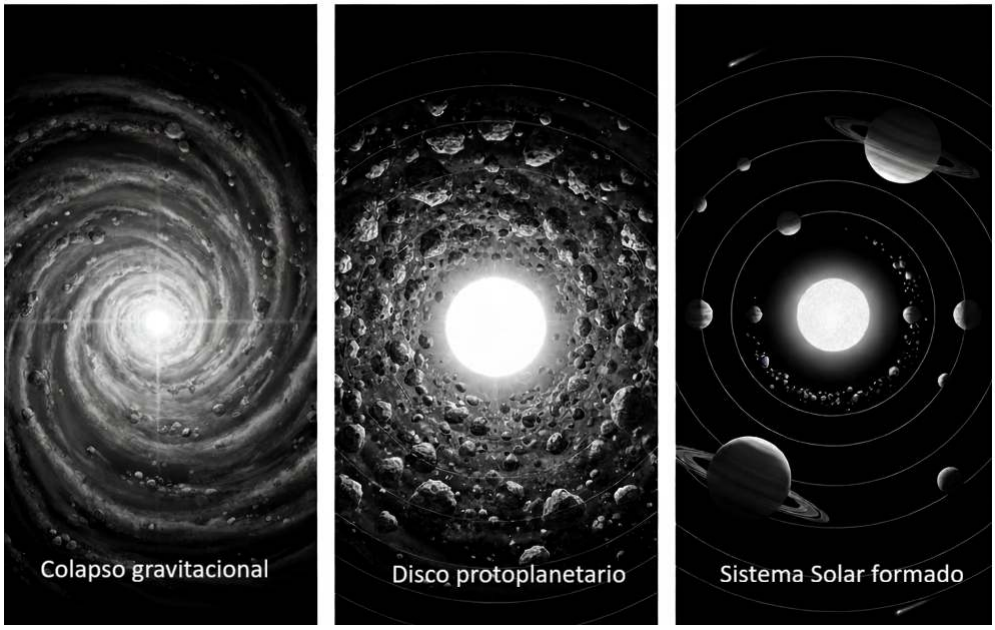


Figura 1: Modelo nebular y la lógica del caos
Representación del modelo nebular y disco protoplanetario del Sistema Solar.
Fuente: Imagen generada por IA con Google Gemini (2026).

La composición del Sistema Solar representa una arquitectura porosa sujeta a la irrupción constante de la contingencia cósmica. La llegada de cuerpos errantes y perturbadores recién descubiertos puede alterar la dinámica de nuestro entorno; tal es el caso del asteroide 2024 YR4 (Navas, 2022), catalogado entre los objetos de alta aproximación y potencial peligro para la Tierra, o de cometas hiperbólicos procedentes de otros sistemas estelares, como el visitante interestelar 3I/Atlas (Navas y Sánchez, 2025), cuya fugaz trayectoria cruzó nuestros dominios antes de perderse definitivamente en el espacio profundo. Estos nuevos componentes celestes, al interactuar dinámicamente con el medio interplanetario, encarnan el principio de incertidumbre de este tejido cósmico, y poseen la capacidad latente de actuar como perturbadores caóticos y transformadores a su paso o, por el contrario, integrarse de manera imperceptible en el orden gravitacional establecido.

Morin (1981) articula esta dualidad observada a través del principio dialógico, dado que el orden y el desorden son coproductores de la realidad. En nuestro Sistema Solar, las leyes

físicas imponen un orden regular en el sistema, pero es la interacción con lo imprevisible y lo contingente, lo que le permite al sistema emerger a estructuras complejas, revelándose así el cosmos como una totalidad dinámica donde el azar y la necesidad, la creación y la destrucción, coexisten y se necesitan mutuamente. Esta visión invita a comprender la formación del Sistema Solar como una metáfora de la vida misma, una danza entre lo previsible y lo inesperado, entre la razón y el asombro, entre el caos y el orden.

La formación de la Luna bajo el principio dialógico (orden y desorden)

Ante la falta de evidencia científica, la Luna fue un símbolo de misterio que alimentó mitos y creencias. Posteriormente, las primeras teorías sobre su origen (captura gravitacional o la fisión terrestre hasta la acreción simultánea) reflejan intentos de simplificar conceptualmente un fenómeno en un contexto ante el profundo desconocimiento de la época.

La Hipótesis del Gran Impacto, hoy ampliamente aceptada, propone que un cuerpo del tamaño de Marte, conocido como *Theia*, colisionó con la Tierra primitiva hace unos 4500 millones de años. Este tremendo impacto no fue un simple golpe; su violencia fue tal que expulsó al espacio una vasta nube de rocas y escombros fundidos. Este material se reconfiguró en un nuevo orden, formando un disco de escombros en órbita alrededor de la Tierra. Con el tiempo, la acción de la gravedad hizo su trabajo, los fragmentos se agruparon, se fusionaron y dieron origen a nuestro satélite natural. Desde entonces, la Luna ha permanecido en órbita sincronizada con la Tierra, razón por la cual solo observamos su misma cara (Galimov et al., 2005). De manera que, tal como lo plantea Edgar Morin en el orden y el desorden, los sistemas complejos emergen del caos mediante procesos de reorganización. Siendo así que la génesis de la Luna no escapa a esta lógica de Morin, ya que se presume que fue un evento violento, caótico y profundamente transformador (Figura 2), y gracias a ese caos, hoy la Luna orbita alrededor de la Tierra reflejando la luz del Sol, como un faro de luz.

Este proceso fue el resultado de interacciones múltiples entre materia, energía y gravedad. Las misiones *Apolo* marcaron un punto de inflexión epistemológica. Las muestras de roca lunar traídas a la Tierra revolucionaron la ciencia planetaria al revelar dos características fundamentales e indispensables para comprender su historia, una etapa de fusión global primitiva (el océano de magma lunar) y una similitud isotópica con el manto terrestre (Wiechert et al., 2001). Esta firma compartida, sumada a la casi total ausencia de elementos volátiles en el suelo lunar, confirmó que la Luna es el resultado de un evento catastrófico altamente complejo que la vincula directamente con nuestro planeta. Así, la Luna pasó de ser un objeto misterioso a convertirse en un testimonio tangible de procesos caóticos que, lejos de ser desorden puro, dieron lugar a un satélite aparentemente estable y coherente orbitando alrededor de la Tierra.

ISSN: 2244-7423

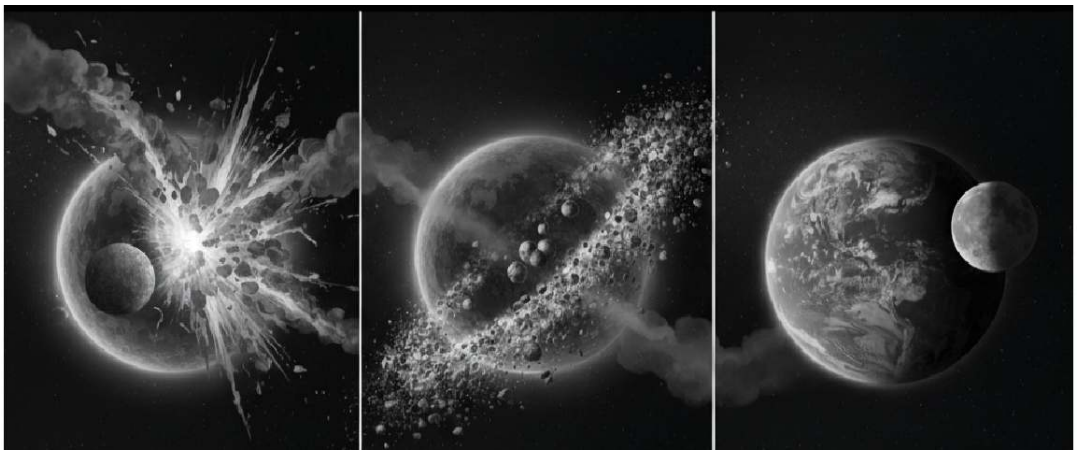


Figura 2: Hipótesis del gran impacto
Representación de la formación de la Luna.
Fuente: Imagen generada por IA con Google (2026).

La formación de la Luna es un testimonio de cómo eventos cósmicos aparentemente caóticos y destructivos fueron, en realidad, fundamentales para la arquitectura de nuestro Sistema Solar y la habitabilidad de la Tierra (Figura 2). Durante la fase de acreción, el impacto masivo que dio origen a la Luna se erige como un ejemplo paradigmático de cómo eventos destructivos y contingentes moldearon la arquitectura final de nuestro sistema. Lejos de ser anomalías, estas catástrofes primitivas fueron esenciales para la configuración de la Tierra actual. Aquel choque colosal no solo aportó la energía necesaria para activar la geodinámica del campo magnético terrestre, sino que dio lugar a un satélite que hoy estabiliza el eje de rotación, regula las mareas y mitiga las variaciones climáticas drásticas. Además, al actuar como un escudo gravitatorio y físico que absorbe el impacto de meteoritos, la Luna resguarda la estabilidad de nuestra superficie. Sin ese evento caótico, la Tierra sería radicalmente distinta y, muy probablemente, un mundo inhóspito.

La recursividad y la estabilización del Sistema Solar

El Sistema Solar logró su configuración actual, aparentemente estable, a través de un proceso que duró cientos de millones de años, impulsado por la dominancia gravitacional del Sol y una compleja fase de auto-organización entre los planetas gigantes. La razón fundamental de la estabilidad reside en que la masa del Sol ($M \sim 1.989 \cdot 10^{30}$ kg) es abrumadoramente mayor que la masa combinada ($M \sim 2.668 \cdot 10^{27}$ kg) de todos los planetas (Kuhn y Noschese, 1999). Esta centralidad gravitacional asegura que todos los cuerpos se muevan en órbitas (elípticas) alrededor del Sol, que son en gran medida, predecibles, ya que las fuerzas de perturbación entre los planetas son insignificantes en comparación con la fuerza ejercida por el Sol (Murray y Dermott, 1999). Sin esta supremacía solar, el sistema se habría desintegrado rápidamente o habría colapsado.

Sin embargo, la estabilidad no fue inmediata. Los modelos científicos indican que el Sistema Solar inicial era caótico y dinámico. La estabilidad se logró a través de una reestructuración violenta, como describe el Modelo de Niza (Tsiganis et al., 2005). Este modelo postula que los planetas gigantes (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno) se formaron inicialmente más cerca unos de otros y luego migraron lentamente hacia sus órbitas actuales (Tabla 1), y los planetas Urano y Neptuno llegaron a intercambiar sus posiciones relativas respecto al Sol. Esta migración masiva desestabilizó grandes reservorios de planetesimales en los cinturones exteriores, provocando el evento conocido como el Bombardeo Intenso Tardío (BIT) (Gomes et al., 2005). Este período caótico sirvió, paradójicamente, para limpiar el sistema de la mayor parte del material errante y empujar a los planetas a las órbitas que hoy conocemos, las cuales son más ampliamente separadas y estables. La estabilización se consolidó cuando los planetas gigantes alcanzaron configuraciones de resonancias orbitales, donde sus periodos de órbita se relacionan en proporciones simples, lo que ayuda a sincronizar y mantener la cohesión de sus movimientos.

Tabla 1: Comparación de masas y distancias heliocéntricas de los planetas gigantes: Configuración inicial del modelo de niza frente a la posición actual.

Planeta	**Masa ($M_\odot$)**	**Distancia Inicial (UA)**	**Distancia Actual (UA)**	**Desplazamiento Dinámico**
Júpiter	317.80	5.45	5.20	Migró ligeramente hacia adentro (perdió energía).
Saturno	95.20	8.18	9.58	Migró hacia afuera.
Neptuno	17.10	11.50	30.05	Migró masivamente hacia afuera (intercambió posición con Urano).
Urano	14.50	14.20	19.22	Migró hacia afuera.

Fuente: Datos adaptados a partir de las simulaciones dinámicas del Modelo de Niza original (Gomes et al., 2005). Las distancias representan los semiejes mayores antes de la resonancia 1:2.

A pesar de esta auto-organización, es crucial entender que la estabilidad del Sistema Solar es solo metaestable a escalas de tiempo cosmológicas. El movimiento de los cuerpos celestes está regido por el problema de los n cuerpos (las interacciones gravitacionales entre múltiples cuerpos), un sistema que es fundamentalmente caótico a muy largo plazo (Laskar, 1989; Poincaré, 1890). Aunque el sistema es predecible en el corto plazo (millones de años), las simulaciones a escalas de miles de millones de años revelan una alta sensibilidad a las condiciones iniciales. Los científicos han demostrado que existe una remota, pero real, posibilidad de que las interacciones gravitacionales complejas puedan, eventualmente, alterar drásticamente la órbita de Mercurio o, incluso, desestabilizar la órbita terrestre antes de que el Sol agote su ciclo de vida (Laskar y Gastineau, 2009). Por lo tanto, el sistema se estabilizó a un equilibrio dinámico que ha sido suficiente para la emergencia y persistencia de la vida, aunque se sabe que ese "supuesto equilibrio" no será eterno.

De manera que podemos pensar que el Sistema Solar se estabilizó y adoptó su configuración actual gracias a la aplicación constante del *Principio de Recursividad Organizacional* de Morin (1994), un concepto que desmantela la causalidad lineal simple. Este principio establece que el producto es, al mismo tiempo, productor de aquello que lo generó, creando un bucle autoconstitutivo. En el contexto astrofísico, esto se manifiesta espectacularmente en el rol de los planetas gigantes. Por ejemplo, Júpiter (el producto final de la acreción) no se limitó a existir; su inmensa masa retroactuó sobre el disco protoplanetario (la causa original de su formación) (Boss, 2004). Su poderosa gravedad actuó como "limpiadora orbital", dispersando, capturando o expulsando grandes poblaciones de planetesimales y cuerpos menores. Este efecto se convirtió en una nueva causa, determinando la composición final del cinturón de asteroides a 2.8 UA (UA, Unidad Astronómica) (evitando la formación de un planeta allí) y, crucialmente, la potencial llegada de agua y volátiles a la Tierra. Este acto de auto-organización recursiva de los gigantes definió los límites dinámicos del sistema interno, creando la estabilidad orbital requerida para la vida.

Aunque el sistema solar exhibe un aparente estado de equilibrio, el Sol es una estrella en plena edad media ($\sim 4,600$ millones de años) cuyo proceso evolutivo romperá este orden. A medida que consuma su helio e hidrógeno, su luminosidad aumentará un 10 % cada 1,000 millones de años, lo que evaporará la biosfera terrestre. Eventualmente, se expandirá como una gigante roja que devorará físicamente a Mercurio y Venus, y arrastrará potencialmente a la Tierra por fuerzas de marea antes de colapsar en una enana blanca (Tabla 2) (Sackmann et al., 1993).

Tabla 2: Parámetros físicos y estados dinámicos en las fases evolutivas del Sol.

Fase Evolutiva	**Escala de Tiempo Relativa (t)**	**Radio Relativo ($R/R_\odot$)**	**Luminosidad Relativa ($L/L_\odot$)**	**Estado Dinámico del Núcleo**
I. Colapso Nebular	$t = 0$	—	—	Contracción gravitacional adiabática.
II. Secuencia Principal	4.6×10^9 años (Hoy)	1.0	1.0	Fusión nucleosintética estable ($4H \rightarrow^4 He$)
III. Gigante Roja	$+5 \times 10^9$ años	200	$\sim 2 \times 10^3$	Núcleo de He degenerado; fusión de H en capa externa.
IV. Remanente	Final del ciclo	0.01	$< 10^{-2}$	Núcleo inerte de C-O sostenido por presión de degeneración electrónica.

Fuente: Datos adaptados de Carroll y Ostlie (2017).

En paralelo a esta transformación física, el Sistema Solar exterior e interior seguirán un destino dinámicamente caótico. Debido a las interacciones gravitacionales complejas y a las resonancias seculares con Júpiter, existe un 1 % de probabilidad de que la órbita de Mercurio se desestabilice críticamente, alterando las trayectorias de Venus, Tierra y Marte, pudiendo provocar colisiones planetarias antes de la muerte del Sol (Laskar y Gastineau, 2009). Ante

este escenario, resulta imperativo dilucidar qué tipo de orden orbital emergerá tras dicho caos dinámico, así como determinar los desafíos existenciales y la evolución tecnológica o biológica que requerirá la humanidad para garantizar su supervivencia en un sistema profundamente transformado.

Mientras que la arquitectura de nuestro Sistema Solar exhibe una aparente serenidad y una metaestabilidad orbital sostenida, el descubrimiento reciente de sistemas exoplanetarios fuertemente caóticos (caracterizados por órbitas altamente excéntricas, migraciones violentas y densas compactaciones dinámicas) evidencia que la turbulencia no es una excepción local. Este contraste entre la moderación relativa de nuestro vecindario cósmico y la extrema volatilidad exoplanetaria refuerza la universalidad del principio dialógico de Edgar Morin, demostrando que la génesis y evolución de los mundos en todo el cosmos no emergen de un determinismo lineal y estático, sino de un acoplamiento inseparable donde el orden y el desorden se co-producen de manera permanente.

Plutón y la caída del paradigma simplificador

La polémica en torno a la pérdida del estatus planetario de Plutón, trasciende el debate puramente astronómico para convertirse en una nítida metáfora epistemológica del pensamiento complejo. Durante décadas, la ciencia educativa e institucional operó bajo un esquema simplificador y estático, donde el Sistema Solar quedaba reducido a una lista invariable de nueve planetas (Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno y Plutón). Sin embargo, el avance tecnológico y el descubrimiento de numerosos cuerpos con masas comparables a Plutón, en las profundidades del Cinturón de Kuiper resquebrajaron esta certeza, obligando a la comunidad científica a confrontar la ambigüedad de sus propias definiciones.

Plutón fue descubierto en 1930 por Clyde Tombaugh y rápidamente fue reconocido como el noveno planeta del Sistema Solar. Durante más de siete décadas, ocupó un lugar en libros de texto, modelos astronómicos y en la imaginación colectiva como un planeta legítimo de nuestro Sistema Solar. Sin embargo, en agosto de 2006, la IAU redefinió oficialmente el término "planeta", estableciendo tres criterios: el cuerpo debe orbitar alrededor del Sol, tener suficiente masa para adoptar una forma esférica, y haber limpiado su vecindad orbital de otros objetos (International Astronomical Union, 2006).

Plutón cumple con los dos primeros criterios establecidos para definir un planeta, pero no con el tercero. Su órbita está compartida con numerosos objetos del cinturón de Kuiper, lo que indica que no ha logrado dominar gravitacionalmente su entorno. Esta observación condujo a su reclasificación como "planeta enano", junto con otros cuerpos como Ceres, Eris, etc. (Minor Planet Center, 2025). Aunque la decisión fue racional y basada en criterios científicos, generó una intensa controversia entre astrónomos, educadores y el público en general (Outer Space,

2026). Como resultado, Plutón fue catalogado por el Minor Planet Center con el número 134340, correspondiente al orden cronológico de descubrimientos registrados hasta esa fecha (Navas, 2022).

Desde la perspectiva del pensamiento complejo de Edgar Morin, este episodio revela la tensión entre lo racional y lo irracional, entre lo correcto y lo cuestionable. La ciencia, en su afán de clasificar y ordenar, tiende a simplificar la realidad para hacerla manejable. Sin embargo, como advierte Morin (1986), la simplificación mutila la complejidad. Plutón, con su órbita excéntrica, su composición mixta de roca, hielo, y su interacción con otros cuerpos transneptunianos, encarna esa complejidad que desafía las categorías rígidas.

La decisión de la IAU puede verse como un acto de racionalidad científica, establecer definiciones claras para avanzar en el conocimiento. Pero también puede interpretarse como una reducción de la riqueza del cosmos a una lógica binaria. ¿Es Plutón un planeta o no? ¿Qué significa realmente limpiar la órbita? En este sentido, el principio dialógico de Morin (1981) que articula la coexistencia de orden y desorden, de certeza e incertidumbre invita a reconsiderar la clasificación no como una verdad absoluta, sino como una construcción contextual y revisable en el tiempo. El caso de Plutón muestra cómo la ciencia no es ajena a lo emocional, a lo simbólico y a lo cultural. La reacción pública ante su "descenso" de categoría, revela que los cuerpos celestes son objetos físicos y también portadores de significado. La racionalidad científica, aunque necesaria, no puede ignorar estas dimensiones. Como plantea Morin (1994), la racionalidad debe dialogar con la afectividad, la subjetividad y la incertidumbre.

Conclusiones

En retrospectiva, la formación y evolución del Sistema Solar se revela no como un proceso lineal y determinista, sino como una narrativa de hipercomplejidad, validando la visión epistemológica de Edgar Morin. El paso de la nube molecular al sistema planetario estable fue un diálogo constante y paradójico. La racionalidad de las leyes físicas, como la gravedad y la conservación del momento angular, impuso el orden y la estructura central (el Sol y el disco protoplanetario). Sin embargo, el éxito del proceso dependió intrínsecamente de la irracionalidad de los eventos contingentes, la onda de choque de una supernova, las colisiones caóticas y la violencia del Bombardeo Intenso Tardío (BIT). Esta aplicación del principio dialógico demuestra que el orden cósmico y el desorden son coproductores esenciales, desmantelando la visión reduccionista del universo como una máquina celeste simple.

La configuración actual del Sistema Solar, y específicamente el lugar de la humanidad en él, es el resultado directo de la recursividad organizacional. La estabilización del sistema no provino de un diseño estático, sino de bucles autoconstitutivos donde los planetas gigantes (el producto) modificaron las órbitas y dispersaron los escombros (la causa), un proceso continuo de auto-organización. Esta dinámica culmina en el principio holográmico,

donde la Tierra emerge como la única parte capaz de inscribir las dualidades del todo. Para que surgiera el homo complexus, nuestro planeta necesitó el equilibrio de la distancia racional al Sol (1 UA, zona de habitabilidad) y su composición irracional, producto del caos con Theia que generó su campo magnético protector. Así la Tierra se puede considerar como la manifestación singular del balance, entre las leyes de la física y la contingencia cósmica.

El debate sobre la reclasificación de Plutón sirve como una metáfora filosófica de la tensión que subyace a todo conocimiento científico. La racionalidad de la IAU buscó simplificar la realidad del cosmos mediante una definición rígida, un acto necesario para el avance científico. No obstante, al hacerlo, se enfrentó a la complejidad inasible que Plutón encarna, desatando una controversia que involucró la emoción y la subjetividad. Este episodio reitera la advertencia de Morin, la ciencia, aunque indispensable, no debe confundir la racionalidad con la totalidad explicativa. El cosmos, al igual que el ser humano, es un sistema donde la incertidumbre y la contradicción no se excluyen, sino que coexisten.

En última instancia, el estudio de la formación, evolución y composición del Sistema Solar, visto a través de la lente de la complejidad de Edgar Morin, ofrece una epistemología transdisciplinar. Al reconocer la génesis de nuestro hogar como un diálogo entre la ley y el azar, entre el orden y el caos, podemos comprender mejor nuestra propia naturaleza racional e irracional.

En conclusión, la formación, evolución y dinámica del sistema solar confirman que el orden macroscópico actual no es un estado permanente, sino como un bucle transitorio suspendido entre dos grandes fases de caos. Si bien fue necesaria la violencia del desorden primitivo (colisiones masivas y migraciones planetarias) para auto-constituir la estabilidad que hoy habitamos, la ineludible evolución termonuclear del Sol y la latente inestabilidad dinámica de Mercurio romperán este equilibrio, sumergiendo de nuevo al sistema en un régimen caótico. Desde la perspectiva de Edgar Morin, este devenir nos sitúa ante la incertidumbre absoluta de una futura reorganización cósmica. La humanidad, como manifestación autoconsciente de este holograma planetario, queda a la expectativa de su propio destino; nuestra supervivencia dependerá de la capacidad de transformar nuestra dualidad racional e irracional en una evolución tecnológica y existencial capaz de emanciparse de la cuna planetaria antes de la metamorfosis final de nuestra estrella.

Referencias

Boss, A. (2004). Evolution of the solar nebula. III. Protoplanetary disk instabilities. *Nature*, *432*, 192-194. https://doi.org/10.1086/177838

Carroll, B., y Ostlie, D. (2017). *An Introduction to Modern Astrophysics (2.ª ed.)* Cambridge University Press.

Gomes, R., Levison, H., Tsiganis, K., y Morbidelli, A. (2005). Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. *Nature*, *435*(7041), 466-469. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2005Natur.435..466G/doi:10.1038/nature03676

Google. (2026). *Representación de la formación de la Luna [Imagen generada por IA con Google Gemini]*. Google. https://gemini.google.com

Google Gemini. (2026). *Representación del modelo nebular y disco protoplanetario del Sistema Solar [Imagen generada por IA con Google Gemini]*. Google. https://gemini.google.com

International Astronomical Union. (2006). *IAU 2006 General Assembly: Result of the IAU Resolution votes*. IAU. https://iauarchive.eso.org/news/pressreleases/detail/iau0603/

Kuhn, J., y Noschese, F. (1999). *Basic Physics: A Teacher's Guide (3.ª ed.)* Jossey-Bass.

Laskar, J. (1989). A numerical experiment on the chaotic behavior of the Solar System. *Nature*, *338*(6212), 237-238. https://doi.org/10.1038/338237a0

Laskar, J., y Gastineau, M. (2009). Existence of collisional trajectories of Mercury, Mars and Venus with the Earth. *Nature Letters*, *459*(7248), 817-821. https://perso.imcce.fr/jacques-laskar/pdf/nature08096&s1.pdf

Minor Planet Center. (2025). *Home page*. https://www.minorplanetcenter.net/

Morbidelli, A., y Raymond, S. (2016). Challenges in planet formation. *Journal of Geophysical Research: Planets*, *121*(10), 1962-1980. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2016JGRE..121.1962M/doi:10.48550/arXiv.1610.07202

Morin, E. (1981). *El Método, Tomo I: La Naturaleza de la Naturaleza*. Cátedra.

Morin, E. (1986). *El Método, Tomo III: El Conocimiento del Conocimiento*. Cátedra.

Morin, E. (1994). *Introducción al pensamiento complejo*. Gedisa.

Murray, C., y Dermott, S. (1999). *Solar System Dynamics*. Cambridge University Press.

Navas, G. (2022). Implicaciones de la propiedad intelectual en la investigación astronómica venezolana, la ética y el reconocimiento de los derechos morales en los descubrimientos. *Propiedad Intelectual*, *23*(3). http://dx.doi.org/10.53766/PI/2022.23.03

Navas, G., y Sánchez, J. (2025). *3I/ATLAS: el tercer mensajero interestelar visto desde la Tierra*. Lainventadera. https://lainventadera.com/2025/10/27/3i-atlas-el-tercer-mensajero-interestelar-visto-desde-venezuela/

Nesvorný, D. (2018). Dynamical evolution of the early Solar System. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, *56*, 137-174. https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081817-052028

Outer Space. (2026). *Why is Pluto no longer a planet?* Library of Congress. https://www.loc.gov/everyday-mysteries/categories/astronomy/item/why-is-pluto-no-longer-a-planet/

Poincaré, H. (1890). Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique. *Acta Mathematica*, *13*(1), 1-270.

Prigogine, I., y Stengers, I. (1984). *Order Out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature*. Bantam Books.

Sackmann, I., Boothroyd, A., y Kraemer, K. (1993). Our Sun. III. Present and future. *The Astrophysical Journal*, *418*, 457-468. https://doi.org/10.1086/177838

Tsiganis, K., Gomes, R., Morbidelli, A., y Levison, H. (2005). Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System. *Nature*, *435*(7041), 459-461. https://doi.org/10.1038/nature03539

Wiechert, U., Halliday, A., Lee, D., Snyder, G., Taylor, L., y Rumble, D. (2001). Oxygen isotopes and the Moon-forming giant impact. *Science*, *294*(5541), 345-348. https://doi.org/10.1126/science.1063037

Williams, J., y Cieza, L. (2011). Protoplanetary disks and their evolution. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, *49*, 67-117. https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081710-102548

Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL)
Revista Electrónica Conocimiento Libre y Licenciamiento (CLIC), Mérida – Venezuela
ISSN: 2244-7423

Los siete saberes de Morin ante la pérdida de la identidad patrimonial arquitectónica

Os sete saberes de Morin diante da perda da identidade patrimonial arquitetônica

Morin's Seven Forms of Knowledge Regarding the Loss of Architectural Heritage Identity

Gabriel Martínez [1]
Mónica Pérez [2]
Universidad Politécnica Territorial de Mérida Kleber Ramírez, Mérida, Venezuela[1,2]
gabriel041195@gmail.com[1]
perezmonic@gmail.com[2]

Fecha de recepción: 12/08/2026
Fecha de aceptación: 30/10/2026
Pág: 177 – 193
DOI: 10.5281/zenodo.23888529

Resumen

El presente ensayo demuestra un análisis crítico sobre la pérdida de identidad patrimonial del Palacio de Gobierno del Estado Bolivariano de Mérida, Venezuela, como edificio ejemplar para el estudio de la arquitectura de la ciudad y su situación actual a través de los "siete saberes necesarios para la educación del futuro", propuestos por Edgar Morín en 1999. Mediante un enfoque interpretativo y documental, se evalúan cómo cada uno de estos saberes (la ceguera del conocimiento, los principios del conocimiento pertinente, la condición humana, la identidad terrenal, la incertidumbre, la comprensión y la ética del género humano) revelan un punto de vista distinto a la problemática que acontece esta edificación patrimonial. El estudio manifiesta que el deterioro y la fragmentación del inmueble no responde a una carencia técnica, sino más bien a una condición epistémica, antropológica y ética. Se concluye que el pensamiento complejo de Morín ofrece un marco interpretativo pertinente para comprender la pérdida de identidad como resultado de una crisis cognitiva y ética, y se plantea la necesidad de asumir el patrimonio edificado como un sistema vivo que amerita un enfoque global.

Palabras clave: arquitectura, epistemología, identidad patrimonial, pensamiento complejo, siete saberes de Morín.

Esta obra está bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0.

Resumo

O presente ensaio apresenta uma análise crítica sobre a perda de identidade patrimonial do Palácio do Governo do Estado Bolivariano de Mérida, na Venezuela — um edifício exemplar para o estudo da arquitetura da cidade —, abordando sua situação atual por meio dos "sete saberes necessários à educação do futuro", propostos por Edgar Morin em 1999. Por meio de uma abordagem interpretativa e documental, avalia-se como cada um desses saberes (a cegueira do conhecimento, os princípios do conhecimento pertinente, a condição humana, a identidade terrena, a incerteza, a compreensão e a ética do gênero humano) revela uma perspectiva distinta sobre a problemática que envolve essa edificação patrimonial. O estudo demonstra que a deterioração e a fragmentação do imóvel não decorrem de uma carência técnica, mas sim de uma condição epistêmica, antropológica e ética. Conclui-se que o pensamento complexo de Morin oferece um referencial interpretativo pertinente para compreender a perda de identidade como resultado de uma crise cognitiva e ética, e aponta-se a necessidade de conceber o patrimônio edificado como um sistema vivo que demanda uma abordagem global.

Palavras-chave: arquitetura, epistemologia, identidade patrimonial, pensamento complexo, sete saberes de Morin.

Abstract

This essay presents a critical analysis of the loss of heritage identity of the Government Palace of the Bolivarian State of Mérida, Venezuela—a building that serves as an exemplary case study for the city's architecture—examining its current state through the lens of the "seven forms of knowledge" (or "seven types of wisdom") essential for the education of the future, as proposed by Edgar Morin in 1999. Through an interpretive and documentary approach, the study evaluates how each of these forms of knowledge—the blindness of knowledge, the principles of pertinent knowledge, the human condition, earthly identity, uncertainty, understanding, and the ethics of the human species—offers a distinct perspective on the challenges facing this heritage structure. The study demonstrates that the deterioration and fragmentation of the building do not stem from technical deficiencies, but rather from epistemic, anthropological, and ethical conditions. It concludes that Morin's "complex thought" provides a relevant interpretive framework for understanding this loss of identity as the result of a cognitive and ethical crisis, and it underscores

the need to view built heritage as a living system that requires a holistic approach.

Keywords: Architecture, heritage identity, epistemology, complex thought, Morin's seven forms of knowledge.

Introducción

El conocimiento general de la sociedad ha sido llevado y convertido en un saber individualista que se maneja dentro de un patrón capitalizado, y muchas veces celado, en el que considerar la solución a un problema debe establecerse en etapas largas y engorrosas, extraviándose la información en el camino, o sin nunca llegar a una solución. El problema se fundamenta en el exceso de datos sin contexto ni conciencia universal como consecuencia de la hiperespecialización. En este sentido, Morin (1999) explica cómo desde el recorrido epistemológico (lo que conocemos) se dirige a lo ontológico (qué somos), de allí a la práxis (cómo actuamos) y concluye en la ética (cómo debemos proceder), siendo ésta una espiral que va desde el sujeto cognoscente al ciudadano planetario. Este autor explica que el conocimiento auténtico no puede fragmentarse, sino que debe ser un proceso evolutivo integral que integre el pensamiento, el ser y la acción.

Frente a esta propuesta metodológica, se busca realizar un análisis crítico e interpretativo de la metodología para el registro técnico y evolutivo de las edificaciones patrimoniales arquitectónicas de la Ciudad de Mérida ante de la pérdida de la identidad histórica, tomando como piloto de estudio el Palacio de Gobierno del Estado Bolivariano de Mérida. Este análisis integra aspectos materiales, sociales, históricos, culturales y legales. Se trata de una edificación diseñada por el arquitecto Manuel Mujica Millán bajo la administración del Presidente Marcos Pérez Jiménez, e inaugurada el 9 de Octubre de 1958 por la junta de Gobierno del contralmirante Wolfgang Larrazábal para celebrar el cuatricentenario de la fundación de la Ciudad, según reseñas del periódico *El Vigilante* (1956, 1958b), con el objetivo de "ser símbolo de gloria y de civilización, dignos de una ciudad que posee un escudo, en el cual están sintetizados brillantes hechos históricos que enorgullecen a sus hijos", de acuerdo con las palabras del Concejal Dr. Pablo Celis Briceño (citado por Altuve, 2004).

La historia de esta sede de gobierno se remonta al espacio de lo que fue el primer ayuntamiento colonial que regía a la ciudad desde su tercera fundación, y desde donde se organizó la planificación y crecimiento urbano, siendo construida la primera edificación en 1613 en la esquina occidental de la Plaza Mayor (González, 2010); para luego trasladarse la Casa de Gobierno en este mismo espacio en 1883 (Calderón y Robinson, 2012). Luego, en 1900, se decretó su refacción para congregar en un solo edificio los despachos de los Poderes Públicos del Estado y del Distrito Libertador (Gaceta Oficial del Estado Mérida, 1900). Y

tras múltiples reparaciones, las intervenciones más contundentes se llevaron a cabo en los años 50, cuando el edificio fue reemplazado por el nuevo palacio en 1958, aportando riqueza monumental al centro de la ciudad y unificando el perímetro de la Plaza Bolívar junto con el Palacio Arzobispal, la Catedral y el edificio del rectorado de la Universidad de los Andes bajo un concepto de modernización urbana (Calderón, 2008; B. Febres-Cordero, 2003).

La construcción de este edificio fue decretada en 1956 por el entonces Gobernador Vicente Tálamo, y sería construido en el sitio donde existía la antigua casa de gobierno y en los terrenos adyacentes que fueron parte de la cárcel, cuartel y la casa de habitación del prócer de la independencia Coronel Vicente Campo Elías (Altuve, 2004; El Vigilante, 1956). Además, fue en esta esquina de la avenida 3 el punto de concentración ciudadano donde se proclamó por primera vez el título de "Libertador" a Simón Bolívar en el año 1813 (Paredes, 1982). Su inauguración se fijó para el 9 de Octubre de 1958, en conmemoración de los cuatrocientos años de la fundación de Mérida, bajo el gobierno de José Román Duque Corredor (Altuve, 2004; Gil y Dávila, 2022). Años más tarde, por su valor arquitectónico e histórico fue declarado Monumento Histórico Nacional en 1980 (Resolución para la Declaración de Edificaciones de Valor Arquitectónico y Urbanístico, 1980), manteniéndose en un estado impecable hasta comienzos de la década de 2000 cuando comenzaron proyectos de intervenciones espaciales, según el testimonio de trabajadores de la institución.

Por lo tanto, el Palacio de Gobierno del Estado Mérida es una edificación que mantiene condensado en su interior una multiplicidad de dimensiones histórica, arquitectónica, política, social, cultural y legal, por lo que su comprensión no puede quedar plasmada y reducida a una simple técnica de levantamiento planimétrico. Requiere, por el contrario, un enfoque epistémico que sea capaz de capturar la complejidad de un edificio que ha sido testigo y protagonista de los avances y crecimiento de la ciudad, y que hoy se encuentra fragmentado administrativamente, afectado por las intervenciones y desprovisto de una memoria histórica.

El presente ensayo tiene como objetivo estudiar cada uno de los saberes que propone Morin (1999) en su obra Los siete saberes necesarios para la educación del futuro, y demostrar cómo cada uno de estos saberes ilustra una dimensión distinta del problema que padece la obra patrimonial. Al mismo tiempo, se busca evidenciar cómo estos saberes se convierten en un ejemplo de comprensión para la obtención de la raíz de los problemas de acuerdo con la complejidad de los pensamientos en la sociedad actual, y que pueda servir de estudio para el análisis de otras edificaciones. El ensayo trata de indagar cómo el pensamiento complejo instala una perspectiva diferente sobre la manera de ver el patrimonio, demostrando que el verdadero desafío no es técnico, sino epistémico, antropológico y ético.

Primer saber: La ceguera del conocimiento, el error y la ilusión

Comprender que todo lo que sabemos no es la verdad absoluta de lo que creemos conocer, es la base inicial para aceptar todo lo que entendemos, percibimos y aprendemos, en el sentido el cual, todo lo que posee una persona de manera innata, natural y asimilada por su cultura, influye en lo que desarrollará y en la manera en cómo lo verá. Es por ello que, si no sabemos cómo se construye el conocimiento, todo lo demás será ingenuo. La base es el diagnóstico inicial.

En este sentido, Morin (1999) plantea que todo conocimiento conlleva, simultáneamente, el riesgo del error y la ilusión. Se entiende así que dicho conocimiento es la construcción de una idea que ha sido condicionada por paradigmas, emociones, intereses, limitaciones biológicas y culturales, lo cual se convierte en un reflejo falso de la realidad. Por otro lado, este autor también menciona que la educación se ha considerado como solamente acumulación de información sin cuestionar las fuentes, generando ideales propios que se traducen en proyecciones de nuestros pensamientos sobre lo real, influencias mentales que deforman, presión grupal por pensamientos generalizados que conllevan a una incapacidad para pensar en lo complejo, siendo de esta manera simplificado y mutilado de la realidad.

Al aplicar el primer saber al Palacio de Gobierno de Mérida, se puede comprender que la forma en que consideran el edificio se encuentra influenciado por diferentes razones que van desde la completitud, hasta la objetividad técnica y la neutralidad de la gestión.

La primera ilusión, la de la completitud, está directamente relacionada con la documentación base del edificio. Actualmente, los planos originales dibujados a mano por el arquitecto Manuel Mujica Millán en 1956 son resguardados por el Archivo Histórico de Mérida y se consideran como la "verdad" de la documentación (Mujica, 1956). Sin embargo, estos planos solo representan un fragmento de dicha verdad, ya que no incluyen intervenciones posteriores, ni registran patologías; algunos de ellos se han extraviado o se encuentran deteriorados a causa de la humedad; además, el manejo del papel ha ocasionado rupturas, dobleces y fracturas, lo cual dificulta su manipulación y, en el mayor de los casos, se ignora su existencia cuando se requiere alguna intervención. Por lo tanto, esta ilusión consiste en creer que solamente con la información planimétrica se conoce el edificio, cuando en realidad éste no está anclado a una memoria histórica documentada que en ocasiones, lo que hace que en realidad se conozca apenas un fragmento de lo que fue en el instante inaugural.

La segunda ilusión, la de la objetividad técnica, lleva a pensar que cuando un arquitecto realiza una intervención sin criterio establecido, o cuando el personal encargado del mantenimiento decide reparar, modificar o ampliar actuando desde su propio criterio, operan bajo la creencia de que están mejorando una realidad objetiva. Morin (1999) recuerda que todo conocimiento está permeado por el sujeto que conoce. Por lo tanto, las intervenciones no registran la historia emocional del espacio, pero sí afectan la funcionalidad y la perspectiva del

presente. En este sentido, la pintura aplicada sobre la fachada del Palacio de Gobierno alteró la esencia natural que se quiso imprimir en el concreto a través de la técnica del aburjadado y el friso pintado naturalmente con óxido, borrando así el color original y la impresión que se pretendía alcanzar (Skinner, 2001; Villegas, 2001); así como también las modificaciones o ampliaciones realizadas transformaron el diseño espacial con el que fue proyectado, sin posiblidades de salvaguardar documentación sobre los cambios.

La tercera ilusión, la neutralidad de la gestión, muestra cómo una unidad puede ser disgregada a partir de la creencia de que trabajar por separado da mejores resultados. Esto se plasma en las diferencias políticas que rigen la institucionalidad, donde cada Concejo (Municipal, Legislativo y Ejecutivo) rige y coordina su porción de edificio, considerando que intervenir solo en su parte es un acto menor y legítimo, sin darse cuenta que al actuar de manera disgregada, están generando un conocimiento igualmente fragmentado, por lo que el edificio se divide literalmente en tres entidades separadas internamente. Esto se considera un error epistemológico que se traduce en errores materiales, como utilizar terrazas para construir oficinas sin considerar la resistencia estructural, o generar divisiones con tabiquerías que confinan la circulación y condicionan la iluminación y ventilación natural.

Con esto, se puede constatar que la ceguera del conocimiento no es un accidente, sino una condición estructural, mental y emocional, donde los diferentes gestores carecen de un marco de pensamiento que les permite ver el edificio como un sistema. Por lo tanto, el conocimiento complejo comienza por reconocer que la sabiduría que poseemos está marcada por el error de la percepción y la posesión de la verdad. En este sentido, se puede apreciar que la investigación no se trata simplemente de un problema técnico a causa de la digitalización planimétrica, mas bien que es profundamente epistémico. Por lo tanto, el edificio no se comprende cabalmente porque no se ha asumido un estudio crítico que reconozca los obstáculos del conocimiento, donde no se puede limitar solo al dibujo de los muros o intervención de espacios, sino que debe incluir una lectura crítica de lo que no se sabe, de las lagunas de información, de las contradicciones documentales y de las decisiones no registradas, para así aceptar esta ceguera como punto de partida.

Segundo saber: Los principios del conocimiento pertinente

El conocimiento pertinente es el método para contextualizar y revincular una vez que tenemos noción de que el conocimiento es frágil. Por lo tanto, es la herramienta para romper paradigmas. Morin (1999) menciona que el conocimiento es pertinente cuando es capaz de situar cualquier información en su contexto y en su totalidad. Para ello, propone principios fundamentales, como el sistémico u organizacional, el hologramático, el del bucle retroactivo, y el de la recursividad. Por lo tanto, se entiende que un conocimiento pertinente es aquel que no aísla su contexto, no linealiza, ni simplifica eliminando aquello que no agrada; sino que articula, conecta y contextualiza.

Para entender el principio sistémico u organizacional del Palacio de Gobierno, es importante concebir que el conocimiento de las partes requiere del conocimiento del todo; quedando en evidencia que de manera obligatoria es requerido desestimar la visión de que una edificación se resume solamente a un conjunto de planos, estructuras y paredes; puesto que, como se ha percatado, el Palacio de Gobierno es un sistema articulado donde interactúan distintas dimensiones. Entre estas dimensiones se describen: la física, a través de materiales, grietas, marcas de humedad, etc; la histórica, que narra eventos en este espacio marcados desde la fundación de la ciudad en los años 1600 hasta la actualidad (El Vigilante, 1956, 1958a; T. Febres-Cordero, 2005; González, 2010); la política, donde conviven los tres principales poderes que dictan la dinámica social: el Municipal, Legislativo y Ejecutivo (Altuve, 2004; Memoria y Cuenta del Secretario General de Gobierno del Estado Mérida, 1956); la urbana, que integra su relación directa con la Plaza Bolívar y la imagen urbana de Mérida (Calderón y Robinson, 2012; T. Febres-Cordero, 2005); la social, que marca la percepción y el comportamiento ciudadano (B. Febres-Cordero, 2003; Pereira, 2019); y la legal, que rige y protege a las edificaciones a través de normativas nacionales (Constitución de la República Bolivariana de Venezuela, 1999; Ley de Protección y Defensa del Patrimonio Cultural de Venezuela, 1993; Resolución para la Declaración de Edificaciones de Valor Arquitectónico y Urbanístico, 1980), regionales (Decreto 155 sobre el Rescate y Conservación de los Valores Tradicionales de la Ciudad de Mérida, 1995; Ley de Protección y Defensa del Patrimonio Cultural y Natural del Estado Mérida, 1998) y locales (Ordenanza de Protección y Defensa del Patrimonio Cultural del Municipio Libertador, 2003). Por lo tanto, un conocimiento pertinente debe integrar todas estas dimensiones, sin privilegiar ni jerarquizar una sobre la otra.

El principio hologramático, por su parte, hace referencia a que las partes están en el todo y el todo está en las partes. Manifestado en el Palacio de Gobierno, significa que cada una de sus partes: una ventana, una moldura, un mural, una grieta contiene en sí misma la historia y la complejidad del edificio entero. Así, por ejemplo, el "Tríptico del Estado Mérida", pintado por Iván Belsky en 1960, representa los valores del Estado y contiene la esencia de un proyecto de ciudad que buscaba integrar tradición y modernidad además de valores agrarios, eclesiásticos y universitarios (Olaechea, 2018). Así como también los murales de "La entrada de Bolívar a Mérida" en conmemoración del sesquicentenario de la Campaña Admirable realizado por Jorge Arteaga en 1963, y "Bolívar destino de la Libertad" realizado por Néstor Melani en 2006 que se encuentran en el Salón del Pueblo, anteriormente llamado Salón Amarillo (Catálogo de Patrimonio Cultural Venezolano 2004-2007, 2007). De igual manera, la sala de sesiones alberga "La Junta Patriótica de Mérida", mural de Marcos León Mariño realizado en 1936, y el escudo en bronce del maestro Ramón Chullia, monumento protegido en declaratoria nacional de 1994 y edificación declarada de interés patrimonial de la ciudad en 2004 (Calderón, 2008). Todas estas obras, y demás que han sido añadidas años más recientes, son hologramas de distintas épocas que dialogan en el espacio.

Por su parte, el principio del bucle retroactivo, donde la causa y efecto se retroalimentan, se aplica al funcionamiento del Palacio de Gobierno cuando la causa, generada por la gestión de los tres poderes público, produce como efecto intervenciones no registradas, generando pérdida de memoria histórica-documental, retroalimentándose y empeorando la deficiencia en la gestión organizacional, convirtiéndolo en un efecto que se vuelve un bucle retroactivo que se reinicia en el tiempo cuando entran nuevas autoridades. Históricamente, este bucle se ha evidenciado desde la Constitución de 1830 en la relación entre la Diputación Provincial (ahora Consejo Legislativo) y el Gobernador, que establecía en su artículo 162 que las ordenanzas de la Diputación se pasaban al Gobernador para su ejecución, quien tenía el derecho de objetarlas en el término de cinco días. Si la Diputación insistía por el voto de las dos terceras partes de sus miembros, se llevaba a efecto la resolución (Zerpa, 1996). Este conflicto constante de poderes, aunque en diferentes contextos, sigue siendo la raíz de la fragmentación actual.

Por otro lado, el principio de la recursividad dicta que los productos y efectos son al mismo tiempo productores y causantes de aquello que los produce. Sin embargo, este ciclo puede ser roto si se observa desde otra perspectiva. Es por ello que el estudio crítico que aquí se plantea no es un producto final, sino un proceso que, al ser asumido, generará nuevos conocimientos que modificarán la propia mirada sobre el edificio, por lo que debe funcionar como un modelo vivo que actualiza constantemente la información y concientiza el pensar de los que lo habitan, mostrando cómo cada intervención afecta al todo, siendo un objetivo no estático, sino un sistema que se transforma.

A tal efecto, la falta de pertinencia demuestra la ausencia del conocimiento total que se puede ver plasmado en un saber que no se contextualiza al tener la ausencia de un ente general que organice la toma de decisiones en las intervenciones a realizar en la edificación. Por otro lado, los planos no son datos neutrales, pero al no tener fácil y rápido acceso, se descontextualizan las tomas de decisiones al desconocer qué espacios poseen los pisos superiores, inferiores y laterales. El conocimiento del edificio necesita de un entorno conceptual adecuado que refleje de manera integrada complejidad, combinando la historia, la geometría, los materiales y las patologías en una sola comprensión. Solo así el conocimiento será pertinente, porque de esta manera se puede comprender claramente lo que en realidad significa este edificio.

Tercer saber: Enseñar la condición humana

La condición humana, a través de los saberes de Morin (1999), da a conocer que un ser no es solamente biológico ni tampoco cultural, sino una unidualidad o biocultural. Es decir, el objetivo de la condición humana es la antropología. El mismo autor sostiene que la educación ha disociado al ser humano en disciplinas separadas de lo biológico, lo psicológico, lo social, lo histórico y lo cultural. Pero, el ser humano es la unión de todo eso. Por consiguiente, el objetivo está en la búsqueda de la restauración de la conciencia en la unidad universal, cultural e histórica, que busca plasmar la identidad individual y la pertenencia a través de una especie

y una sociedad.

Aplicar la condición humana al Palacio de Gobierno de Mérida significa reconocer que este edificio no es simplemente un monumento material, sino que posee un simbolismo psicológico y humano que condensa un abanico de experiencias espaciales que todo arquitecto maneja en su diseño, y que se manifiesta a nivel emocional y conductual en el comportamiento y desempeño de las personas que lo habitan; hecho que Mujica Millán dominaba al sustentar sus juegos de alturas, de entradas y salidas, acabados, ornamentos y uso de patios internos donde se incluyen todas las dimensiones de la condición y necesidades humanas que han sido alteradas.
Inicialmente, dentro de las dimensiones biológicas y físicas, se puede constatar que el edificio está construido de concreto y acero con detalles y acabados de madera (Contrato de la Casa de Gobierno con la C.A. Recolda, 1956; Memoria y Cuenta del Secretario General de Gobierno del Estado Mérida, 1957), y que éstos responden a leyes físicas como el peso, la gravedad y la fatiga, por lo que está sujeto a procesos biológicos y plagas estructurales que han afectado su resistencia, al igual que las perforaciones realizadas en el concreto de revestimiento, muros y losas de entrepiso.

En cuanto a las dimensiones psicológicas y emocionales, este Palacio fue concebido inicialmente para albergar en un mismo núcleo el funcionamiento de los tres Poderes Públicos (Contrato de la Casa de Gobierno con la C.A. Recolda, 1956), y su configuración espacial está concebida para ser un reflejo de jerarquía y orden (Mujica, 1956). Sin embargo, la fragmentación actual ha generado un ambiente de desacuerdo entre las diferentes entidades que se ve reflejado en las múltiples intervenciones.

Por otro lado, la dimensión cultural y social se manifiesta a través del simbolismo que plasma la fachada de la edificación en sí y los diferentes murales inscritos dentro de la misma, que son una afirmación de la condición humana de Mérida, de su identidad y de su proyecto de ciudad, reflejando las luchas y aspiraciones de una sociedad en constante evolución. No obstante, esta identidad se ha visto alterada desde el momento en que se modificó el color original de la fachada para aplicar nuevas técnicas (Skinner, 2001; Villegas, 2001). Además, es notorio en la marca de filtración que posee actualmente el fresco del techo en el Salón del Pueblo como resultado de la implementación de piezas sanitarias en las plantas superiores.

Todos estos actos repercuten directamente en el bienestar social, que se puede apreciar claramente en la teoría de la ventana rota escrita por Wilson y Kelling (1982), en donde mencionan que, si se rompe un vidrio de una ventana de un edificio y nadie lo repara, pronto estarán rotos todos los demás. Si una comunidad exhibe signos de deterioro y esto parece no importarle a nadie, entonces allí se generará el delito. También explican que, si se cometen pequeñas faltas y estas no son sancionadas, evolucionarán a faltas mayores y luego a delitos más graves. Y a pesar que esta teoría habla directamente sobre la formación de delitos y deterioro de grupos sociales en grandes ciudades, no deja de tener vigencia si lo llevamos al

contexto del cuidado de las edificaciones, en donde la imagen del mismo influye directamente en la conducta de las personas y en la imagen de la ciudad.

Finalmente, para comprender la unidad compleja, hay que describir que el error de los gestores del Palacio de Gobierno es tratar cada dimensión por separado. Al construir oficinas anexas en la terraza pensaron solamente en su necesidad operativa (dimensión social), sin considerar el peso estructural (dimensión física) ni el lenguaje arquitectónico (dimensión cultural). Por otro lado, el Concejo Municipal posee bienes muebles patrimoniales de grandes artistas plásticos que han sido desplazados de su lugar originario para su contemplación. Cada una de estas transformaciones es un acto humano, una elección que revela la incapacidad de ver el edificio como un todo. Es por ello que en la edificación se evidencia la urgencia de repensar cada espacio, pasillo y oficina a través de un proyecto de rediseño de interiores para que le recupere el concepto de "Palacio" con el que fue inicialmente establecido, y así prescribir la condición humana que lo habita y lo transforma. Morin (1999) plantea que enseñar la condición humana es enseñar la complejidad de lo que somos.

Cuarto saber: Enseñar la identidad terrenal

La identidad terrenal indica que el ser humano no vive aislado, vive en una aldea global interconectada y en crisis. Por lo que el escenario de la identidad terrenal es la geopolítica. Morin (1999) postula que no basta con saber que somos humanos, sino que debemos entender que somos ciudadanos de la Tierra, donde son todos afectados por los problemas ecológicos, económicos, nucleares y comunicacionales que nos han hecho seres interdependientes de grandes masas y élites, pero con una educación fragmentada, con el objetivo de debilitar el pensamiento propio y anclarse más al razonamiento manipulable. Por lo tanto, la identidad terrenal nos enseña la conciencia de que todos compartimos un mismo hogar, que los destinos de las personas, las naciones y la biosfera están entrelazados.

Aplicar este cuarto saber al Palacio de Gobierno da a entender que, aunque es un edificio regional venezolano, lo global está en lo local, y que el patrimonio arquitectónico es una expresión de identidad terrenal, porque es un lenguaje universal que conserva personalidad e historia, y esta edificación es, ante todo, un bien patrimonial inmueble de Venezuela, que no pertenece solo a los merideños o venezolanos, sino a toda la humanidad. También, está anclado al alto valor que posee el arquitecto que lo diseñó y por todas sus obras a nivel nacional e internacional que tienen su firma, que no solo aporta riqueza monumental al centro de la ciudad, sino que conecta a Mérida con las corrientes arquitectónicas modernas del siglo XX (Calderón y Robinson, 2012; Muñoz, 2000). Por lo tanto, todas estas obras se entrelazan en un punto único que mantienen la misma esencia, estilo, detalles y acabados que le imprime el arquitecto.

Es de acuerdo a este principio universal que se entiende que el estado interno del Palacio

de Gobierno no se cataloga como un problema aislado, sino como un síntoma de una crisis amplia que se ha extendido por los países y continentes, y se demuestra en las diferentes crisis de regímenes políticos inestables que también han afectado la gestión patrimonial a través de la falta de conciencia histórica y la ciencia del patrimonio. Por lo que, esta historia no pertenece a Venezuela solamente; es parte de la memoria compartida de los continentes, que se ve reflejado en la pérdida de información de los planos originales y edificaciones deterioradas. Por lo tanto, esta crisis es planetaria, ya que en muchos lugares del mundo el patrimonio edificado está siendo debatido y destruido por creencias propias o filosóficas (Hernando, 2009).

Consecuentemente, enseñar la identidad terrenal, dentro de este contexto, significa comprender que, al mantener el Palacio de Gobierno de Mérida, también se cuida parte de la memoria de la humanidad, lo que lo hace ser un deber universal. Es por ello que, la información histórica no debe catalogarse como un archivo cerrado; ésta debe ser unificada y compacta, accesible, abierta y compartible; que sirva también como una herramienta global para arquitectos, restauradores e investigadores de todo el mundo. Si Mérida pierde su memoria, el mundo pierde una pieza de su rompecabezas histórico. Y para evitar esto, el primer paso es comprender, documentar, sistematizar y preservar, para luego intervenir y valorar.

Quinto saber: Enfrentar las incertidumbres

La incertidumbre de los eventos nos indica que, como cada escenario es impredecible, no sirven los programas rígidos, sino que requieren estrategias abiertas. Por ende, la actitud es la metodología de acción. Morin (1999) sostiene que la historia es imprevisible, que las certezas del pasado se han derrumbado y que el futuro es un abanico abierto de posibilidades. La educación, por su parte, ha enseñado a manejar lo conocido, lo estable y lo programado. Pero la vida diaria demuestra que existen eventos aleatorios, bifurcaciones y crisis inesperadas. Por lo tanto, es importante aprender a manejar las incertidumbres adoptando estrategias en lugar de programas rígidos, ya que una estrategia es flexible y se adapta a distintas circunstancias, aprende del error y aprovecha lo imprevisto como oportunidad, donde la capacidad de enfrentar lo desconocido es más valioso que el conocimiento de lo conocido.

El Palacio de Gobierno es un monumento que no escapa de la incertidumbre, por lo cual su historia misma es una sucesión de eventos impredecibles que comienzan desde la elección exacta del terreno para su fundación, los diferentes eventos sísmicos que derrumbaron a la ciudad en varias oportunidades, la construcción y demolición del antiguo ayuntamiento colonial, y la nueva construcción del palacio en 1958, con grandes intervenciones después del año 2000. Ninguno de estos eventos ha sido planeado ni plasmado en planos ni documentos oficiales, por los que todos son respuestas contingentes a contextos políticos y sociales cambiantes. La propia construcción del Palacio estuvo marcada por la incertidumbre: el costo total de la obra superó el presupuesto inicial, pasando de 2.4 a 2.7 Millones de Bolívares (Altuve, 2004; Contrato de la Casa de Gobierno con la C.A. Recolda, 1956; Gil y Dávila, 2022). También se

desconoce si las obras de arte fueron parte de la planificación del proyecto general propuesto por Mujica Millán, ya que no se ha conseguido documentación que los asevere o niegue, pero sí se puede constatar que el mural de "La entrada de Bolívar a Mérida" de Jorge Arteaga en 1963 no estuvo previsto en la constitución arquitectónica espacial del actual Salón del Pueblo, porque los planos plasman una solución diferente para este espacio (Mujica, 1956).

Este principio lleva a generar una lista de incertidumbres, entre las cuales se encuentran vacíos históricos surgidos al desconocer la cantidad de intervenciones menores, y lo limitado de los datos que se pueden recuperar a través de documentos oficiales que se encuentran en el Archivo Histórico de Mérida. Además, las incertidumbres técnicas generan dudas respecto a que las tecnologías sean insuficientes o requieran adaptaciones imprevistas; tal es el caso de las herramientas libres y privativas, donde las primeras pueden no ser notablemente eficaces y las segundas, aunque adecuadas, resultan costosas. En ese sentido, asignar herramientas de registro digital también puede ser insuficiente para almacenar y gestionar la complejidad de datos históricos, patológicos y materiales que se requieren, aparte de la cantidad y calidad de equipos que puedan designarse para este estudio.

En este sentido, la incertidumbre humana es impredecible en el momento de desconocer si las autoridades presentarán interés para continuar desarrollando investigaciones similares y adoptar un estudio de rescate documental para aplicarlo en otras edificaciones. A su vez, es pertinente conocer si los funcionarios asignados para esta tarea tendrán la disposición de aprendizaje o presenten resistencia al cambio, como puede ocurrir en espacios organizacionales. Por último, al considerar la incertidumbre ambiental, desconocemos si el suelo y clima de Mérida afectará en la conservación de las edificaciones, puesto que en el país se pueden presentar terremotos o inundaciones que podrían dañar el edificio antes de que el estudio se realice.

Frente a todas estas incertidumbres, Morin (1999) ofrece una lección crucial donde enseña que este análisis no puede ser rígido, sino una estrategia abierta, que incluya mecanismos de adaptación, que permita actualizaciones de datos constantes para nuevas intervenciones o nuevos hallazgos históricos e incluir un asiento de incertidumbres documentadas donde se señale explícitamente lo que se desconoce, para que futuros investigadores puedan completarlo. Esto fortalece la investigación, porque la hace honesto y adaptable. La incertidumbre no es un fracaso del conocimiento; es su condición de posibilidad.

Sexto saber: Enseñar la comprensión

La comprensión menciona que, para actuar juntos en la incertidumbre, necesitamos entendernos superando egos y etnocentrismos. El vínculo es la intersubjetividad, entendiendo que la comprensión es la ética relación con las diferencias de los otros. Morin (1999) distingue dos formas de comprensión: la intelectual, a través de entender un concepto, un texto o una

situación; y la humana, infiriendo al otro sus motivaciones, sus emociones y su contexto. Señala también los obstáculos a la comprensión, como el egocentrismo, el etnocentrismo, el dogmatismo, la intolerancia y la indiferencia. La verdadera comprensión no es un acto pasivo, sino de apertura, empatía y diálogo, sin ello la comunicación falla, los conflictos se perpetúan y la convivencia se vuelve imposible.

Al analizar la incomprensión aplicada al Palacio de Gobierno de Mérida, se manifiesta que el problema del edificio no es solo técnico o histórico; es, fundamentalmente, un problema de ininteligibilidad humana, partiendo del hecho de que los tres Poderes Públicos comparten el edificio pero no se comunican para generar acuerdos sobre la conservación del inmueble. Esto demuestra una suerte de egocentrismo institucional, mediante el cual cada ente prioriza sus necesidades inmediatas sin considerar el impacto que ocasiona en el todo. Lo mismo puede afirmarse de las diferentes marcas históricas que han dejado los regentes, donde cada uno produce una huella de intervención sin comprender que la edificación es un patrimonio que trasciende a sus ocupantes.

Morin (1999) sostiene que la comprensión requiere ponerse en el lugar del otro. En este sentido, un estudio crítico e integrador podría ser el primer paso para promover la comunicación y discernimiento entre los diferentes poderes públicos. Si un ente centralizado toma la autoridad para organizar el edificio, y todos los datos arquitectónicos estuvieran centralizados en un mismo modelo accesible, los funcionarios podrían visualizar cómo sus decisiones afectan a los demás. Estos datos se evaluarían y analizarían para su aprobación o corrección mediante el diálogo colectivo. De esta manera, se puede demostrar que realizar modificaciones es un problema de imagen y acondicionamiento integral del espacio.

Por lo tanto, dentro de este recorrido en el Palacio de Gobierno, se constata que los funcionarios responden a un sistema que omite comprender el todo y afecta el desenvolvimiento de los trabajadores (Pallasmaa, 2006). Es por ello que la fragmentación del edificio no es solo física; es mental. Un estudio crítico de documentación histórica es un modelo de comprensión que necesita ser manejado con sutileza para evitar malentendidos, lo que corresponde a mostrar las interdependencias y a hacer visible lo invisible. Esto se manifiesta como una forma de ética aplicada al diseño. La comprensión es el puente entre el conocimiento y la acción responsable.

Séptimo saber: La ética del género humano

La ética explica que todos los saberes anteriores confluyen en una responsabilidad moral de acuerdo a la triada: Individuo ↔ Sociedad ↔ Especie. La culminación de todo es la teleología, es decir, los fines, propósitos o causas finales. Morin (1999) menciona que la ética no puede reducirse a solo una de estas tres dimensiones, sino que debe abarcarlas a todas. Por lo tanto, la ética del género humano debe ser una ética de solidaridad entre los individuos, de responsabilidad hacia las futuras generaciones y la biosfera; y de la antropoética, que cuida la

condición humana en su integridad. Por lo que la toma de decisiones a partir de la conciencia, trae repercusiones positivas o negativas en diferentes niveles en el individuo, en la sociedad y en la especie. La educación debe fomentar esta ética tridimensional para que haya equilibrio entre los ciudadanos de una misma comunidad de destino.

Por lo tanto, la ética en la responsabilidad del cuidado del patrimonio debe operar también dentro de los tres niveles que describe este autor, en la cual, el análisis crítico del Palacio de Gobierno no es un fin en sí mismo; sino un vehículo para la ética del patrimonio. En este sentido, los niveles que describe el mencionado autor se relacionan en lo siguiente:

1. Ética del individuo: El investigador tiene la responsabilidad de realizar un trabajo riguroso, responsable y honesto a través de la investigación bibliohemerográfica, fotográfica, estadística y presencial en el sitio, que luego pueda ser plasmada en un modelo de registro que refleje la competencia técnica, el compromiso ético con la verdad y la transparencia de la información. También debe ser precavido en cuanto a las decisiones metodológicas en los datos que incluirá, priorizará e interpretará, ya que estos tienen consecuencias en la conservación del edificio.

2. Ética de la sociedad: Este estudio tiene como objetivo servir de análisis a la gobernación, a los estudiantes, a los investigadores y al público en general, por lo que implica una ética de accesibilidad y liberación del conocimiento, donde la información debe ser clara, abierta y reusable, de fácil acceso público y descargable. Este no puede quedar simplemente como un archivo cerrado o dentro de un lenguaje técnico incomprensible; debe ser un instrumento que permita a los ciudadanos conocer y valorar el patrimonio. Por otro lado, es pertinente promover la coordinación y unidad entre los distintos entes para ofrecer un espacio de diálogo y planificación, por lo que mantener la ética dentro de las decisiones que toman los poderes públicos es fundamental para cumplir una función social eficiente.

3. Ética de la especie: La metodología de estudio para el Palacio de Gobierno de Mérida debe estar diseñado para ser replicable en otras edificaciones patrimoniales en Venezuela y cualquier lugar del mundo. Ésta debe ser una contribución a la memoria global de la humanidad, al tomar en cuenta que los cambios climáticos, desastres naturales, conflictos políticos y abandono amenazan al patrimonio edificado y, por lo tanto, cualquier esfuerzo por documentar y preservar es un acto de resistencia ética (Hernando, 2009).

En consecuencia, comprender la ética del género humano al intervenir un edificio patrimonial implica reconocer que este trasciende el concreto y el acero: constituye un tejido vivo de historias, aspiraciones y transformaciones que documenta la evolución de la humanidad. Por ello, el análisis documental de esta investigación trasciende la mera solución técnica para

constituirse en un acto ético orientado a salvaguardar la memoria histórica, preservar la autenticidad de sus elementos originales y garantizar la integridad física y espacial del bien frente al deterioro.

Así pues, la ética del género humano, desde su sentido más profundo, es la conciencia de que estamos todos habitando el mismo planeta; y el Palacio de Gobierno, desde su ubicación en la Plaza Bolívar de Mérida, recuerda que la memoria de una población es compartida, que está anclada a un mundo incierto, pero que mantiene depositado en sí la esencia de una población que crece, se desarrolla y muere, dejando herederos de culturas y saberes. Por lo tanto, preservar esa memoria es, en definitiva, preservar nuestra capacidad de ser humanos.

Conclusiones

Morin (1999), a través de sus siete saberes, explica como un conocimiento comienza a desarrollarse desde la epistemología a través de los errores y las ilusiones del conocimiento, hasta desembocar en la ética. La espiral que propone aplicar es un mapa de transformación para cualquier investigador. En este sentido, el Palacio de Gobierno del Estado Mérida, que al principio se veía como un objeto de estudio, se ha ido revelando y mostrando como un sistema vivo, un testimonio histórico, un espacio para el desarrollo de las políticas públicas, una muestra de la condición humana y un reclamo ético ante el impacto de las decisiones en la edificación y en la identidad de la población.

Cada uno de los saberes ha demostrado diferentes facetas de la problemática; todos juntos señalan el verdadero desafío epistémico, antropológico, político, ético y legal, más allá de lo meramente técnico. Por lo cual, el estudio crítico debe ser un instrumento de pensamiento complejo, una herramienta que permita reconocer sus propias limitaciones y errores. Se requiere contextualizar el edificio en su totalidad sistémica, integrar las dimensiones físicas, históricas, políticas, sociales, culturales y legales de la condición humana, conectar el patrimonio local con la memoria planetaria, ser flexible y adaptativo entre los distintos actores, y servir como un acto de responsabilidad ética hacia el individuo, la sociedad y la especie, dando a entender que la espiral del conocimiento no tiene fin, sino vueltas que llevan a niveles más profundos de conciencia. Por lo tanto, al asumir este estudio, comprendiendo al Palacio de Gobierno como un ser vivo que habla desde el pasado y desafía el presente, y no como un objeto muerto, se habrá determinado la práctica concreta, material y transformadora de la humanidad.

Referencias

Altuve, F. (2004). El Palacio de Gobierno de Mérida. (Diciembre 2004 – Febrero 2005. Archivo General del Estado Mérida, Ed.). *El Reportero*, *16*(28).

Calderón, E. (2008). *Museo a Cielo Abierto (1ª ed.).* Alcaldía del Municipio Libertador, FUNDACITE, Ministerio de Ciencia y Tecnología.

Calderón, E., y Robinson, D. (2012). *Mérida: encuentro con su patrimonio arquitectónico (1ª ed.)* Universidad de Los Andes, Talleres Gráficos Universitarios.

Catálogo de Patrimonio Cultural Venezolano 2004-2007. (2007). *Región Los Andes. Estado Mérida. Municipio Libertador*. Instituto de Patrimonio Cultural, Ministerio del Poder Popular para la Cultura.

Constitución de la República Bolivariana de Venezuela. (1999). *Gaceta Oficial Extraordinaria N° 36.860*. Artículo 99 de fecha 30 de diciembre de 1.999.

Contrato de la Casa de Gobierno con la C.A. Recolda. (1956). *Región Los Andes. Estado Mérida. Municipio Libertador*. Archivo Histórico del Estado Mérida.

Decreto 155 sobre el Rescate y Conservación de los Valores Tradicionales de la Ciudad de Mérida. (1995). *Gaceta Oficial del Estado Mérida*. Nro. 63 del 31 de marzo del 1995.

El Vigilante. (1956). *El Palacio de Gobierno. Boletín Oficial. 13 de marzo de 1956*. Biblioteca Febres Cordero.

El Vigilante. (1958a). *Calurosa Bienvenida a la Junta de Gobierno. 9 de octubre de 1958*. Biblioteca Febres Cordero.

El Vigilante. (1958b). *Programa del IV Centenario de la Fundación de Mérida. 2 de octubre de 1858*. Biblioteca Febres Cordero.

Febres-Cordero, B. (2003). *La arquitectura moderna en Mérida 1950-1959*. Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico de la Universidad de Los Andes.

Febres-Cordero, T. (2005). *Clave histórica de Mérida (6ª ed.)* Publicaciones del Vicerrectorado Académico. Universidad de los Andes.

Gaceta Oficial del Estado Mérida. (1900). *Ley de Presupuesto*. Nro. 16 (6). Mérida, 6 de octubre de 1900.

Gil, R., y Dávila, L. (2022). *Figuras de la Merideñidad*. Vol. II. Academia de Mérida. Universidad de Los Andes.

González, H. (2010). *El ayuntamiento en los orígenes y consolidación de la sociedad colonial merideña (1558-1622)*. Instituto Municipal de la Cultura del Municipio Libertador.

Hernando, J. (2009). *Patrimonio histórico e ideología. Sobre vandalismo e iconoclastia en España: del siglo XIX al XXI*. Nausícaä.

Ley de Protección y Defensa del Patrimonio Cultural de Venezuela. (1993). *Gaceta Oficial N° 4.623*. Extraordinario el 3 de octubre de 1993.

Ley de Protección y Defensa del Patrimonio Cultural y Natural del Estado Mérida. (1998). *Gaceta Oficial del Estado Mérida Nº 83*. Extraordinaria el 2 de abril de 1998 (Decreto Nº 198).

Memoria y Cuenta del Secretario General de Gobierno del Estado Mérida. (1956). *Imprenta oficial*. Archivo Histórico del Estado Mérida.

Memoria y Cuenta del Secretario General de Gobierno del Estado Mérida. (1957). *Imprenta oficial*. Archivo Histórico del Estado Mérida.

Morin, E. (1999). *Los siete saberes necesarios para la educación del futuro*. UNESCO.

Mujica, M. (1956). *Planos del Palacio de Gobierno del Estado Mérida [Planos arquitectónicos].* Archivo Histórico de Mérida, Mérida, Venezuela.

Muñoz, M. (2000). *Manuel Mujica Millán: aproximación a su idea de ciudad. Proyecto de la Urbanización "El Rosario" en Mérida.* Consejo de Publicaciones de la Universidad de Los Andes.

Olaechea, S. (2018). *Análisis interpretativo de las imágenes análogas. La ciudad de Mérida y su cultura urbana en tres obras murales de Iván Belsky* [Tesis de Licenciatura]. Universidad de Los Andes, Venezuela.

Ordenanza de Protección y Defensa del Patrimonio Cultural del Municipio Libertador. (2003). *Gaceta Municipal del Estado Mérida.* No. 79-0151 del 08 de Julio de 2004.

Pallasmaa, J. (2006). *Los ojos de la piel: La arquitectura y los sentidos.* Editorial Gustavo Gili.

Paredes, P. (1982). *Mérida y Bolívar.* Sociedad Bolivariana de Venezuela. Centro correspondiente al Estado Mérida.

Pereira, N. (2019). *Mérida, Ciudad y Patrimonio. Una estrategia de abordaje construida desde el hacer (1ª ed.)* Universidad de los Andes.

Resolución para la Declaración de Edificaciones de Valor Arquitectónico y Urbanístico. (1980). *Gaceta Oficial de la República de Venezuela No.* 32.039 del 04 de agosto de 1980.

Skinner, R. (2001). *Amarillo M.* En Frontera. 24 de Enero de 2001.

Villegas, B. (2001). *La Gobernación tiene el color de la polémica.* En Frontera. 5 de enero de 2001.

Wilson, J., y Kelling, G. (1982). *Broken Windows. The police and neighborhood safety.* The Atlantic Monthly.

Zerpa, T. (1996). *La Diputación Provincial de Mérida: Acuerdos, Ordenanzas y Resoluciones 1830-1857* [Tesis de Licenciatura]. Universidad de Los Andes, Venezuela.

Experiencias de Tecnologías Libres



Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL)
Revista Electrónica Conocimiento Libre y Licenciamiento (CLIC), Mérida – Venezuela
ISSN: 2244-7423

KAVAC: Sistema de código abierto para la gestión integral de recursos organizacionales

KAVAC: Sistema de código aberto para a gestão integral dos recursos organizacionais

KAVAC: An open-source system for the comprehensive management of organisational resources

Roldan Vargas
Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres, Mérida, Venezuela
rvargas@cenditel.gob.ve

Fecha de recepción: 11/08/2026
Fecha de aceptación: 28/09/2026
Pág: 195 – 204
DOI: 10.5281/zenodo.23888696

Resumen

El presente artículo describe el origen, la evolución técnica y la arquitectura del sistema KAVAC, un software libre desarrollado por la Fundación CENDITEL para la gestión integral de recursos organizacionales (ERP). Surgido en 2016 como una solución modular para sustituir al Sistema Administrativo Integrado Descentralizado (SAID), KAVAC fue diseñado bajo principios de trazabilidad, integridad de datos, escalabilidad y mantenibilidad a largo plazo. El documento aborda el proceso de transición metodológica a través de la Metodología de Desarrollo Colaborativo de Software Libre (MDCSL), el trabajo interdisciplinario y el historial de versiones liberadas. Asimismo, se analizan los desafíos técnicos superados al transitar hacia un sistema de código abierto orientado a la automatización administrativa en el sector público e institucional.

Palabras clave: arquitectura modular, automatización administrativa, gestión de recursos organizacionales (ERP), KAVAC, software libre.

Esta obra está bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0.

Resumo

Este artigo descreve a origem, a evolução técnica e a arquitetura do sistema KAVAC, um software livre desenvolvido pela Fundação CENDITEL para a gestão integral de recursos organizacionais (ERP). Surgido em 2016 como uma solução modular para substituir o Sistema Administrativo Integrado Descentralizado (SAID), o KAVAC foi projetado com base em princípios de rastreabilidade, integridade de dados, escalabilidade e manutenibilidade a longo prazo. O documento aborda o processo de transição metodológica por meio da Metodologia de Desenvolvimento Colaborativo de Software Livre (MDCSL), o trabalho interdisciplinar e o histórico de versões lançadas. Além disso, são analisados os desafios técnicos superados na transição para um sistema de código aberto voltado à automação administrativa no setor público e institucional.

Palavras-chave: arquitetura modular, automação administrativa, gestão de recursos organizacionais (ERP), KAVAC, software livre.

Abstract

This article describes the origin, technical evolution, and architecture of the KAVAC system, a free software solution developed by the CENDITEL Foundation for comprehensive organizational resource management (ERP). Emerging in 2016 as a modular solution to replace the Decentralized Integrated Administrative System (SAID), KAVAC was designed based on principles of traceability, data integrity, scalability, and long-term maintainability. The document addresses the methodological transition process utilizing the Free Software Collaborative Development Methodology (MDCSL) as well as the interdisciplinary work involved and the history of released versions. Additionally, it analyzes the technical challenges overcome during the transition to an open-source system designed for administrative automation within the public and institutional sectors.

Keywords: modular architecture, administrative automation, organizational resource management (ERP), KAVAC, free software.

Introducción

KAVAC es un sistema multipropósito orientado a la planificación y gestión de recursos organizacionales, el cual abarca diferentes aristas como el manejo de recursos financieros, económicos, bienes, materiales y humanos, además de la gestión de compras y almacén, integrando y automatizando los procesos administrativos garantizando la autenticidad e

integridad de la información (CENDITEL, 2018). Nació como una propuesta de solución a un problema concreto, pero con el tiempo se transformó en una herramienta robusta y de amplia aplicación en diferentes sectores u organizaciones.

Su propósito es ofrecer una alternativa escalable y de fácil mantenimiento frente a sistemas que, con el tiempo, se vuelven complejos de sostener, simplificando y automatizando la gestión de los procesos organizacionales con elementos de seguridad e integridad de datos que llevan una traza histórica de la información registrada. Su impacto no solo se mide en los tiempos de respuesta o eficiencia en los procesos, sino también en la cantidad de organizaciones que lo solicitan y lo han adoptado como herramienta para gestionar sus actividades.

Detrás del desarrollo de KAVAC hay una historia de necesidad, aprendizaje, pruebas y decisiones técnicas que marcaron su evolución. De ser una idea, terminó convirtiéndose en un proyecto nacional como una potente herramienta de código abierto para la gestión de los procesos en las organizaciones. Este artículo recorre la historia de su origen, cómo fue construido, las tecnologías que lo sustentan, sus principales bondades, los desafíos que enfrentó y hacia dónde se dirige.

Origen: La historia detrás de la herramienta

Para entender cómo KAVAC llegó a ser la herramienta que es actualmente, hay que remontarse a su antecesor. Antes de KAVAC existía una aplicación llamada SAID (Sistema Administrativo Integrado Descentralizado), desarrollada inicialmente por la Fundación para la Ciencia y Tecnología del Estado Mérida (FUNDACITE Mérida) en el año 2005 y posteriormente adoptada por el equipo de desarrollo de la Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL) en el año 2007, luego de la migración de gran parte del personal técnico de FUNDACITE Mérida a dicho ente (Figura 1). Este sistema cumplió la función para la cual fue desarrollada, pero con el tiempo y avance tecnológico fue mostrando signos de deficiencia, en cuanto que los ajustes y correcciones fueran casi nulos por falta de documentación sobre los procesos, así como una arquitectura de desarrollo rudimentaria y bastante rígida. De igual forma, su mantenimiento se volvía cada vez mas complejo y las incidencias dejaron de ser excepciones para convertirse en rutina, dando claros indicios de que su vida útil estaba a punto de culminar.

Con el auge de nuevas tecnologías y *frameworks* que agilizan el desarrollo, y ante las limitaciones del SAID, surgió la iniciativa de comenzar un desarrollo de otra herramienta que facilitara los procesos administrativos, mantuviera una curva de vida útil prolongada y fuera fácilmente escalable y mantenible. Es de esta forma que en 2016 se comenzó a establecer la estructura inicial como base para el desarrollo de un software, con el objetivo de implementar todas las funcionalidades que poseía el SAID, además de una estructura abierta para la incorporación de nuevas características, sin que esto representara un mayor esfuerzo o

inestabilidad en las funcionalidades ya implementadas.

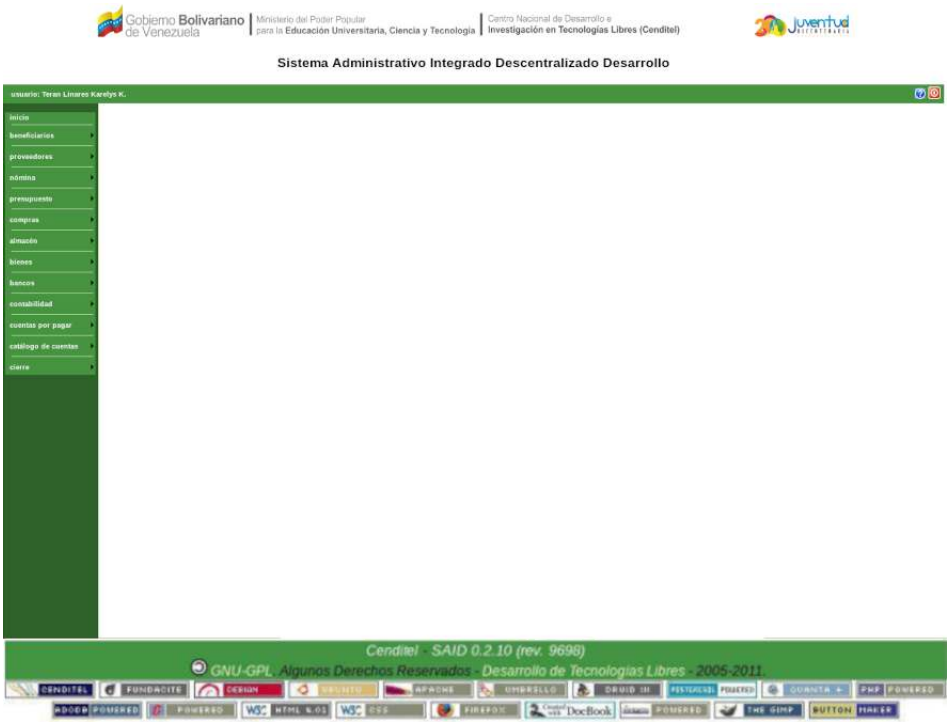


Figura 1: Sistema Administrativo Integrado Descentralizado (SAID).
Fuente: Elaboración propia (2026).

A mediados del año 2017 se propone como un proyecto de CENDITEL y se plantea su inclusión en el Plan Operativo Anual (POA) 2018. Este año inicia como proyecto institucional y se asignan los recursos financieros y humanos para su desarrollo, contando inicialmente con un equipo de 5 personas (entre desarrolladores y analistas). A medida que el software ha ido creciendo, se sumaron a este proyecto alrededor de unas 38 personas, entre ellas colaboradores externos, diseñadores, analistas de pruebas, entre otros, al igual que nuevos desarrolladores y analistas funcionales.

Inicialmente con el nombre de SAID, posteriormente como "Sistema de Recursos Organizacionales" y finalmente llamado KAVAC (en honor a una monumento natural ubicado en el Estado Bolívar con el nombre de las cuevas de Kavac), se inicia la travesía de desarrollo de una herramienta de código abierto que pretende posicionarse como una opción libre ante otras herramientas privativas.

A la fecha de la publicación de este artículo se han liberado varias versiones, las cuales se mencionan a continuación:

- v1.0.0: Liberada el 09 de Abril de 2022, fue la primera versión de lanzamiento.

- v1.0.1: Liberada el 14 de Mayo de 2022 con la implementación de nuevas funcionalidades y ajustes.
- v1.0.2: Se liberó el 16 de Diciembre de 2022
- v1.0.3: Liberada el 12 de Julio de 2023
- v1.0.4: Liberada el 04 de Noviembre de 2023
- v1.0.5: Liberada el 27 de Agosto de 2024
- v1.0.6: Liberada el 07 de Abril de 2026
- v1.1.0: Liberada el 17 de Abril de 2026 como una versión mayor, nuevas características, estructura y procesos.

Desarrollo del sistema KAVAC

El desarrollo de KAVAC comenzó con una etapa que resultó mas desafiante de lo previsto, ya que no solo fue escribir código, sino que partió de repensar la arquitectura, elegir las herramientas adecuadas y aprender en el proceso sobre las tecnologías y la construcción de una herramienta pensada para una vida útil prolongada.

Esto exigió una disciplina que iba mas allá de la programación: la planificación y seguimiento de las actividades de todo el equipo incorporado al proyecto, el uso de la Metodología de Desarrollo Colaborativo de Software Libre (MDCSL) de CENDITEL (2015), la iteración constante sobre el desarrollo de las funcionalidades y una capacidad de adaptación que el propio desarrollo fue enseñando durante todo el proceso (Figuras 2 y 3).

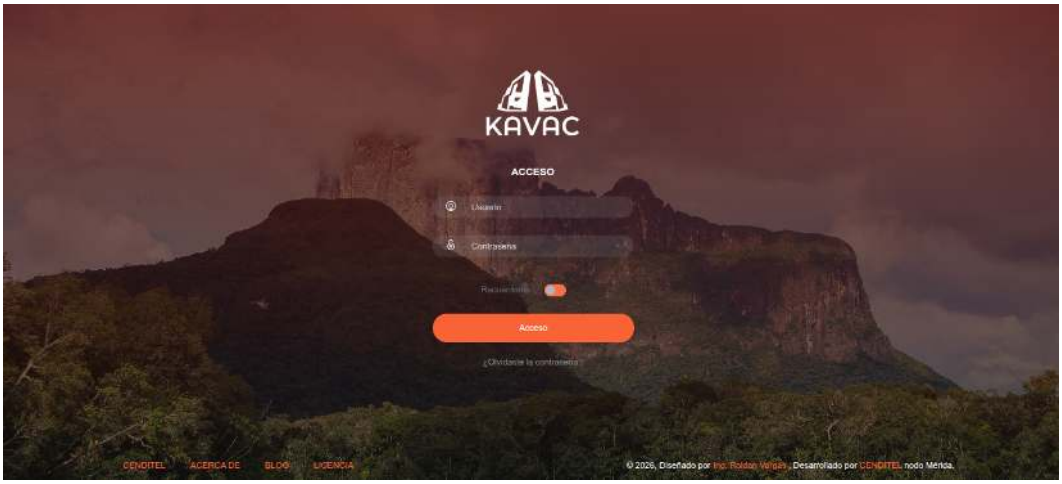


Figura 2: Acceso KAVAC.
Fuente: Elaboración propia (2026).

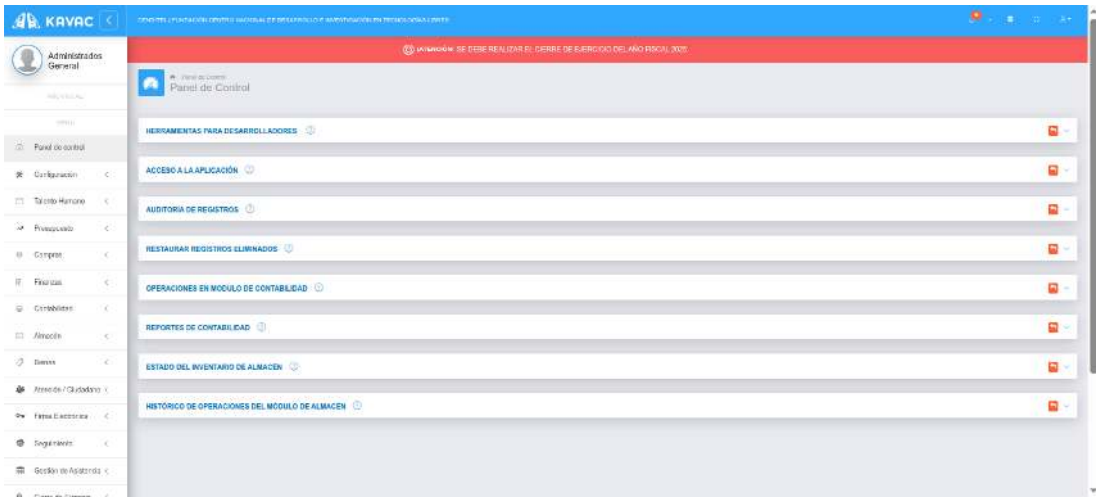


Figura 3: Panel de control KAVAC.
Fuente: Elaboración propia (2026).

Construir KAVAC implicó enfrentar una pregunta: ¿Cómo evitar repetir los errores del sistema anterior? La respuesta estaba en un conjunto de decisiones técnicas: una arquitectura más modular, un código más limpio, un diseño atractivo y adaptable, una documentación amplia y una lógica de mantenimiento que no dependiera de una sola persona.

En la actualidad, el desarrollo de esta herramienta está conformada por un equipo multidisciplinario que, a través de los diferentes roles que desempeñan (desarrolladores, analistas funcionales, analistas de pruebas, analistas de operaciones e infraestructura, documentadores, diseñadores, colaboradores, entre otros), han hecho posible fortalecer e incorporar nuevas funcionalidades y mejorar el desempeño de sus procesos. Cada obstáculo y cada decisión dejaron lecciones que fueron lo que realmente dio forma al software. Y para entender el software, conviene mirar las herramientas, los lenguajes y las tecnologías que lo hicieron posible.

Tecnologías utilizadas para el desarrollo

Detrás de cada funcionalidad de KAVAC existe un conglomerado de decisiones técnicas que determinó la elección de las tecnologías. Cada lenguaje, *framework* y herramienta respondió a una necesidad concreta del proyecto, por lo cual construirlo implicó algunas interrogantes: ¿Qué lenguaje y *framework* utilizar sin sacrificar la robustez?; ¿Qué base de datos permitiría gestionar volúmenes de datos sin comprometer la información?; ¿Qué arquitectura facilitaría el mantenimiento a largo plazo?; ¿Cómo implementar la modularidad del software?; ¿Cómo mantener la integridad de los datos y la traza de registros? Estas fueron algunas interrogantes que plantearon el escenario para el desarrollo inicial del proyecto.

En respuesta a tales cuestiones, se llevó a cabo un estudio preliminar sobre las herramientas y/o lenguajes para seleccionar el ecosistema tecnológico a utilizar de acuerdo a varios factores, entre los cuales se consideraron las tecnologías emergentes de código abierto, la continuidad con respecto al lenguaje utilizado en la herramienta anterior para facilitar la migración de procesos y la curva de aprendizaje de las herramientas para la incorporación de nuevo talento humano. Luego del análisis realizado sobre que ecosistema de desarrollo a utilizar se determinó el uso de las siguientes herramientas:

- Lenguaje de programación PHP en su versión 5.6.4
- *Framework* de *Backend* Laravel en su versión 5.4.0
- Base de Datos PostgreSQL 9.5
- Hojas de estilo CSS3
- Lenguaje de Marcas de Hipertexto o HTML5.
- Javascript en su estándar *ECMAScript 2016*.
- *Framework* de *Frontend* VueJS en su versión 2.6
- Arquitectura de software Monolítica basada en el patrón Modelo-Vista-Controlador (MVC).

Con el pasar del tiempo, la evolución de las tecnologías y el crecimiento acelerado de estas herramientas, se han actualizado estas versiones a las mas recientes disponibles y soportadas por el desarrollo de funcionalidades de KAVAC, lo cual ha permitido mejorar su rendimiento.

Características destacadas y limitaciones

Cada característica de KAVAC responde a un requerimiento concreto. Por lo tanto, fueron pensadas para resolver necesidades reales: las que motivaron su creación y las que aparecieron durante su crecimiento como resultado del flujo de trabajo con usuarios finales.

KAVAC ofrece un conjunto de características funcionales y técnicas que lo posicionan como una herramienta robusta y versátil. Entre ellas destacan una arquitectura modular que permite agregar o eliminar funcionalidades, facilitando adaptar el software a las necesidades reales del organismo que lo adopte. Así mismo, cuenta con una aplicación base que concentra todas las funcionalidades de uso común; como niveles de acceso granulares los cuales permiten otorgar o denegar el acceso a las funcionalidades por cada uno de los módulos disponibles; una bitácora de registros que mantiene una traza histórica de toda la información registrada por los usuarios permitiendo la recuperación de datos en caso de requerirlo; un sistema de auditoria que permite llevar un control sobre las acciones de los usuarios; y un conjunto de módulos

para gestionar los procesos presupuestarios, financieros, contables, bienes y almacén. Cada una de estas funcionalidades esta orientada a resolver problemas específicos de la Administración Pública Nacional (APN), sin embargo, el ecosistema y arquitectura de la aplicación permite su uso en diferentes tipos de organizaciones públicas o privadas.

Otras bondades a destacar son la facilidad de uso de KAVAC, debido al diseño intuitivo y la amplia documentación existente; un rendimiento aceptable en los procesos para soportar gran cantidad de carga y consulta de información; una escalabilidad sobre sus procesos actuales que permite extender sus funcionalidades; niveles de seguridad que van desde la autenticación del usuario hasta verificación de datos en sus procesos a través de medidas de defensa contra la "Falsificación de Petición en Sitios Cruzados" (o CSRF por sus siglas en inglés). Así mismo, KAVAC permite la integración con otros sistemas sin complejas implementaciones; dispone de una amplia comunidad de soporte tanto por parte de CENDITEL como de colaboradores externos; es accesible debido a que esta desarrollado bajo código abierto y licenciamiento para el libre uso y es fácil de actualizar a través de los diferentes canales dispuestos para ello.

Claro está, ningún software es perfecto, y KAVAC no es la excepción. Reconocer sus limitaciones es tan importante como destacar sus bondades, porque solo así se entiende su verdadero alcance y su potencial de mejora. Algunas limitaciones de esta herramienta están asociadas a la dependencia técnica en cuanto a la concepción inicial del proyecto, su estructura y cómo funcionan algunos procesos de base, lo cual requiere un periodo de adaptación y formación de talento humano técnico debido a la constante ampliación del equipo de desarrollo. Así mismo, uno de los mayores desafíos ha sido su implementación a nivel nacional, lo cual ha requerido un gran esfuerzo por parte de la Fundación CENDITEL para lograr los objetivos planteados y la atención a los usuarios.

Casos de uso del sistema KAVAC

Diversos organismos nacionales han adoptado KAVAC, bien sea evaluando su factibilidad de implementación o integrándolo directamente en sus procesos y actividades. Entre ellos destacan:

- Entes Adscritos al Ministerio del Poder Popular para Ciencia y Tecnología:
    - Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales (ABAE)
    - Fundacite Táchira. San Cristóbal Estado Táchira.
    - Fundacite La Guaira. La Guaira Estado La Guaira.
    - Fundacite Guayana. Guayana Estado Bolívar.
    - Fundacite Falcón. Coro Estado Falcón.
    - Fundacite Anzoátegui. Lechería Estado Anzoátegui.

    - Fundación Instituto de Ingeniería para Investigación y Desarrollo Tecnológico (FIIIDT). Caracas Distrito Capital.
    - Comisión Nacional de las Tecnologías de Información (CONATI). Caracas Distrito Capital.

- Hospitales:

    - Hospital Militar Universitario Dr. "Carlos Arvelo". Caracas Distrito Capital.
    - Hospital Universitario Antonio Patricio de Alcalá (HUAPA). Cumaná Estado Sucre.
    - Instituto Hospital Universitario de Los Andes (IHULA). Mérida Estado Mérida.

- Universidades:

    - Universidad Simón Bolívar (USB). Baruta Estado Miranda.
    - Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales "Ezequiel Zamora" (Unellez). Barinas Estado Barinas.

- Filiales de PDVSA:

    - PDV Servicio de Salud
    - Hospital Coromoto. Maracaibo Estado Zulia.
    - Hospital Industrial Jesús Farías. Barcelona Estado Anzoátegui.

- Fundación para el Desarrollo del Servicio Eléctrico (FUNDELEC). Caracas Distrito Capital.

- Instituto Autónomo de Servicios de Bibliotecas e Información del Estado Bolivariano de Mérida (IBIME). Mérida Estado Mérida.

La lista de implementación y adopción de KAVAC se encuentra en constante crecimiento, así como también las solicitudes de atención de organismos a nivel nacional.

Conclusiones

Cuando en 2016 se planteó desarrollar un software para superar las limitaciones de la herramienta anterior, no había forma de prever cuáles serían sus alcances. Hoy queda claro que KAVAC superó todas las expectativas: no solo resolvió el problema que lo vio nacer, sino que se convirtió en una solución tecnológica a gran escala. Cada limitación identificada es una oportunidad de mejora; cada organismo que lo adopta, un nuevo desafío de adaptación.

Más allá de su impacto operativo, KAVAC representa un aporte concreto al ecosistema de Software Libre en el país. Su desarrollo demuestra que es posible construir herramientas robustas, escalables y adaptables utilizando tecnologías abiertas, sin depender de licencias propietarias ni de soluciones extranjeras cerradas. En un contexto donde muchas instituciones aún dudan de la viabilidad del Software Libre para proyectos críticos, KAVAC se convierte en un caso de referencia, ya que prueba que la soberanía tecnológica es una decisión de diseño, método y perseverancia. Su existencia abre la puerta a que otras iniciativas locales sigan el mismo camino.

En el plano metodológico, el desarrollo de KAVAC dejó aprendizajes que trascienden el proyecto mismo. Quedó claro que no existe una única forma correcta de construir software, sino que la clave está en adaptar el método al contexto, al equipo y a los recursos disponibles. La iteración constante, la validación temprana con usuarios reales y la disposición a reescribir lo que no funciona resultaron muy valiosas para el desarrollo. También quedó demostrado que documentar el proceso, aunque parezca una tarea secundaria, es lo que permite que un proyecto sobreviva a sus creadores y pueda ser adoptado por otros.

En lo técnico, la principal lección fue que la arquitectura importa tanto como la funcionalidad. Un software puede resolver un problema hoy y volverse insostenible mañana si no se diseña pensando en su mantenimiento y escalabilidad. En lo organizacional, KAVAC enseñó que la adopción de una herramienta no depende solo de su calidad técnica, sino de la capacidad de las instituciones para adaptarse al cambio. La resistencia inicial, la necesidad de capacitación y la diversidad de contextos exigieron un acompañamiento constante, algo que ningún desarrollador puede dar por sentado. Estas lecciones no solo aplican a KAVAC, sino que son válidas para cualquier proyecto de software que aspire a perdurar.

Referencias

CENDITEL. (2015). *Metodología para el desarrollo colaborativo de software libre (Versión 2).* https://www.cenditel.gob.ve/static/biblioteca/2015/mpdcsl/mpdcsl.pdf

CENDITEL. (2018). *Wiki del proyecto.* https://gestion.cenditel.gob.ve/trac/wiki/kavac

Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL)
Revista Electrónica Conocimiento Libre y Licenciamiento (CLIC), Mérida – Venezuela
ISSN: 2244-7423

Arquitecturas de seguridad IoT: Control de acceso, vigilancia y trazabilidad con código abierto

Arquiteturas de segurança IoT: controle de acesso, vigilância e rastreabilidade com código aberto

IoT security architectures: Access control, surveillance, and traceability with open source

María Paola Urbina [1]
Hernán Ramírez [2]
Universidad Politécnica Territorial de Mérida Kleber Ramírez, Mérida, Venezuela[1,2]
paolaurbina1997@gmail.com[1]
hernan.ramirez@gmail.com[2]

Fecha de recepción: 24/04/2026
Fecha de aceptación: 08/09/2026
Pág: 205 – 218
DOI: 10.5281/zenodo.23888726

Resumen

La convergencia entre la Tecnología de la Información (IT) y la Tecnología de las Operaciones (OT) ha expuesto a los sistemas industriales a nuevas vulnerabilidades. Los enfoques tradicionales de seguridad física suelen depender de sistemas propietarios de alto costo, limitando su adaptabilidad y auditoría. Este artículo propone el diseño, implementación y evaluación empírica de una arquitectura de seguridad IoT orientada a entornos industriales, basada íntegramente en Software de Código Abierto (OSS). Aplicando la metodología de Ciencia del Diseño (*Design Science Research* - DSR), se construyó un artefacto multicapa que integra nodos perimetrales (ESP32 con tecnología NFC y ESP32-CAM con sensores PIR) comunicados mediante el protocolo ligero MQTT con un orquestador central desarrollado en Django y PostgreSQL. A diferencia de enfoques puramente teóricos, el sistema fue sometido a pruebas de rendimiento en una red local aislada. Los resultados experimentales revelaron que el principal cuello de botella en la baja latencia no reside en la capa de transporte, sino en el manejo sincrónico del orquestador al registrar eventos inmutables y en los tiempos de inicialización del hardware en el borde (*Edge*).

Esta obra está bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0.

Esta identificación condujo a una iteración arquitectónica hacia modelos asíncronos. El sistema validó una reducción drástica de costos frente a alternativas comerciales y garantizó la trazabilidad exigida por normativas como la IEC 62443, sentando bases auditables y resilientes para la futura integración de la inteligencia artificial en la gestión de telemetría y seguridad.

Palabras clave: ciencia del diseño, evaluación de rendimiento, internet de las cosas, seguridad industrial, software de código abierto.

Resumo

A convergência entre a Tecnologia da Informação (TI) e a Tecnologia de Operações (TO) expôs os sistemas industriais a novas vulnerabilidades. As abordagens tradicionais de segurança física geralmente dependem de sistemas proprietários de alto custo, limitando sua adaptabilidade e capacidade de auditoria. Este artigo propõe o projeto, a implementação e a avaliação empírica de uma arquitetura de segurança IoT voltada para ambientes industriais, baseada inteiramente em Software de Código Aberto (OSS). Aplicando a metodologia de *Design Science Research* (DSR), construiu-se um artefato multicamadas que integra nós de borda (Edge) — ESP32 com tecnologia NFC eESP32-CAM com sensores PIR — comunicando-se via protocolo leve MQTT com um orquestrador central desenvolvido em Django e PostgreSQL. Diferentemente de abordagens puramente teóricas, o sistema foi submetido a testes de desempenho em uma rede local isolada. Os resultados experimentais revelaram que o principal gargalo para a baixa latência não reside na camada de transporte, mas sim no processamento síncrono do orquestrador ao registrar eventos imutáveis e nos tempos de inicialização do hardware na borda (*Edge*). Essa constatação levou a uma iteração arquitetônica em direção a modelos assíncronos. O sistema demonstrou uma redução drástica de custos em comparação com alternativas comerciais e garantiu a rastreabilidade exigida por normas como a IEC 62443, estabelecendo bases auditáveis e resilientes para a futura integração de inteligência artificial na gestão de telemetria e segurança.

Palavras-chave: ciência do design, avaliação de desempenho, internet das coisas, segurança industrial, software de código aberto.

Abstract

The convergence of Information Technology (IT) and Operational Technology (OT) has exposed industrial systems to new vulnerabilities. Traditional physical

security approaches often rely on high-cost proprietary systems, limiting their adaptability and auditability. This article proposes the design, implementation, and empirical evaluation of an IoT security architecture oriented towards industrial environments, based entirely on Open Source Software (OSS). Applying the Design Science Research (DSR) methodology, a multi-layer artifact was built integrating edge nodes (ESP32 with NFC technology and ESP32-CAM with PIR sensors) communicating via the lightweight MQTT protocol with a central orchestrator developed in Django and PostgreSQL. Unlike purely theoretical approaches, the system was subjected to performance tests in an isolated local network. Experimental results revealed that the primary bottleneck in achieving low latency does not lie in the transport layer, but in the synchronous handling of the orchestrator when recording immutable events and the initialization times of the Edge hardware. This identification led to an architectural iteration towards asynchronous models. The system validated a drastic cost reduction compared to commercial alternatives and guaranteed the traceability required by standards such as IEC 62443, laying auditable and resilient foundations for the future integration of artificial intelligence in telemetry and security management.

Keywords: design science research, performance evaluation, internet of things, industrial security, open source software.

Introducción

El despliegue acelerado del Internet de las Cosas (*Internet of Things* - IoT) en el ámbito industrial ha transformado radicalmente la gestión de activos y la monitorización de infraestructuras críticas. Sin embargo, esta hiperconectividad amplía exponencialmente la superficie de ataque al unificar los vectores de amenaza físicos y digitales (Ungurean y Gaitan, 2020). Proteger el perímetro industrial requiere sistemas capaces de autenticar identidades de manera eficiente, denegar accesos no autorizados, registrar evidencia visual reactiva ante intrusiones y mantener una bitácora auditable de cada evento dentro del ecosistema.

Históricamente, las organizaciones han dependido de soluciones de seguridad físicas de carácter monolítico y propietario. No obstante, estos enfoques de alto costo limitan severamente la adaptabilidad de los dispositivos, elevan los gastos de capital y oscurecen la auditoría del código fuente subyacente. Frente a este escenario de dependencia tecnológica, el Software de Código Abierto (OSS) surge como una alternativa técnica viable, robusta y transparente para el codiseño de hardware y software periférico.

Con el propósito de mitigar estas vulnerabilidades sin incurrir en costos prohibitivos de licenciamiento, este artículo propone el diseño, implementación y evaluación empírica de una arquitectura de seguridad IoT multicapa orientada a entornos industriales, basada íntegramente en herramientas de código abierto.

El trabajo se estructura de la siguiente manera. En primer lugar, se detalla la aplicación de la Ciencia del Diseño (DSR) y se desglosa la arquitectura lógica de tres capas (borde, comunicación y aplicación), especificando el funcionamiento de los nodos perimetrales basados en microcontroladores ESP32 y ESP32-CAM. A continuación, se describe la implementación del protocolo ligero MQTT sobre un broker Mosquitto y el rol orquestador del *framework* Django para la gestión persistente en PostgreSQL y la mitigación de vulnerabilidades web nativas. Más adelante, se examina el mecanismo de cadena de custodia digital a través de marcas de tiempo NTP y hashing criptográfico (SHA-256) bajo los lineamientos de la normativa ISA/IEC 62443. Finalmente, se exponen las pruebas de rendimiento en red local aislada, identificando los cuellos de botella de latencia sincrónica en el backend y los tiempos de inicialización del hardware en el borde, lo que justifica la posterior iteración arquitectónica hacia modelos asíncronos.

Método

Para el desarrollo de la arquitectura de seguridad objeto de este estudio, se adoptó la metodología de la Ciencia del Diseño (*Design Science Research* - DSR). A diferencia de las ciencias naturales o sociales, cuyo objetivo es explorar y explicar la realidad existente, la DSR se centra en la creación y evaluación de artefactos tecnológicos innovadores diseñados específicamente para resolver problemas prácticos y complejos del mundo real (Muntean y Militaru, 2022). Un artefacto dentro de este paradigma puede constituir un modelo, un método, una construcción o, como en este caso, una arquitectura de sistemas integrados de hardware y software.

La elección de la DSR se fundamenta en su capacidad para unificar el rigor científico con la relevancia práctica, estructurando el proceso de investigación a través de ciclos iterativos de diseño, implementación y evaluación empírica.

El punto de partida metodológico consistió en delimitar la problemática actual en la convergencia de las Tecnologías de la Información (IT) y las Tecnologías de la Operación (OT) dentro de los entornos industriales. La proliferación de dispositivos IoT expone de forma crítica los perímetros físicos y digitales a vectores de ataque complejos. Al constatar que las soluciones tradicionales de seguridad suelen basarse en sistemas propietarios de alto costo que limitan la adaptabilidad y restringen las auditorías de código, se estableció la necesidad técnica de diseñar una alternativa viable, económica y transparente.

Arquitectura técnica del sistema

El artefacto propuesto se fundamenta en una arquitectura lógica de tres capas: modelo funcional, comunicación y aplicación. Esta estructura jerárquica, detallada en la Figura 1, permite el desacoplamiento de funciones y propicia la escalabilidad del sistema, garantizando además que el impacto de posibles compromisos de seguridad se limite a nodos individuales, protegiendo así la integridad global de la red (Ficili et al., 2025).

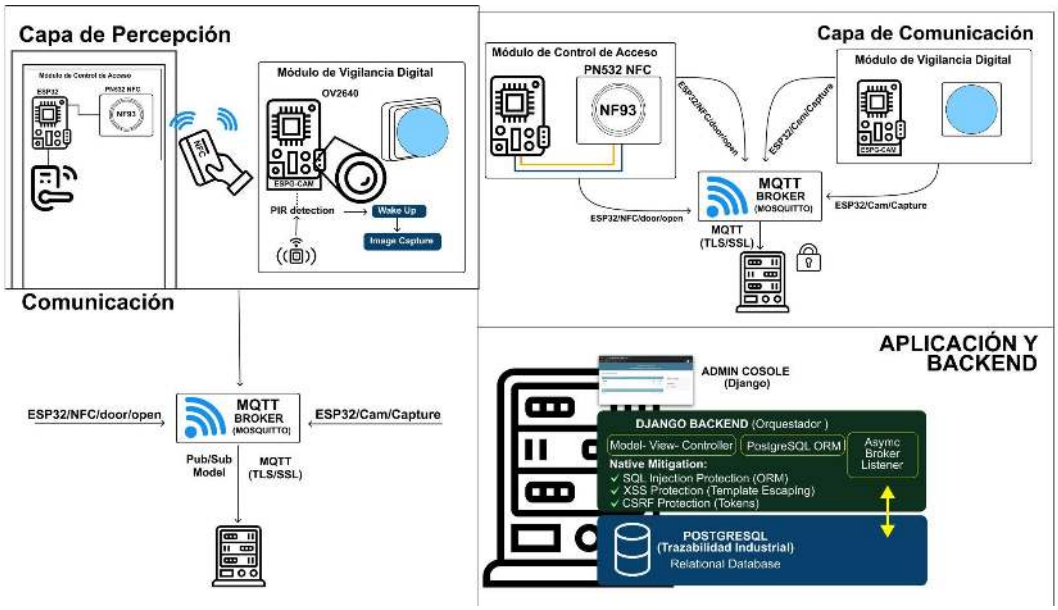


Figura 1: Arquitectura de tres capas para el sistema de seguridad IoT (percepción, comunicación y aplicación).

Fuente: Elaboración propia (2026).

Modelo funcional (Borde/*Edge*)

La capa de percepción actúa como la interfaz directa entre el entorno físico y el ecosistema digital. Para este diseño se han seleccionado componentes de hardware de muy bajo costo y alto rendimiento, programados mediante el framework C++/Arduino, los cuales se señalan a continuación:

1. Módulo de control de acceso: Se fundamenta en un microcontrolador ESP32 integrado con un lector NFC (*Near Field Communication*) modelo PN532. Este nodo se encarga de leer el identificador único (UID) de las tarjetas o tokens criptográficos de los operarios. La lógica del borde valida preliminarmente la estructura del token antes de solicitar autorización. Una vez el backend aprueba el acceso, el ESP32 acciona el dispositivo que actúa como mecanismo de apertura (cerradura electromecánica inteligente).

2. Módulo de vigilancia digital: Este sub-sistema emplea un ESP32-CAM equipado con un módulo de cámara OV2640. En lugar de transmitir un flujo de video constante (lo cual saturaría el ancho de banda y generaría un alto consumo energético), el nodo opera bajo un modelo reactivo impulsado por un sensor infrarrojo pasivo (PIR). Al detectar una firma térmica en movimiento, el PIR interrumpe al microcontrolador, el cual despierta de su estado de bajo consumo, captura una secuencia de fotografías de alta resolución y extrae los metadatos de la imagen para su envío inmediato.

La integración del hardware en el borde permite el procesamiento inmediato de credenciales y señales de movimiento. El esquema de interconexión de estos componentes se presenta en la Figura 2.

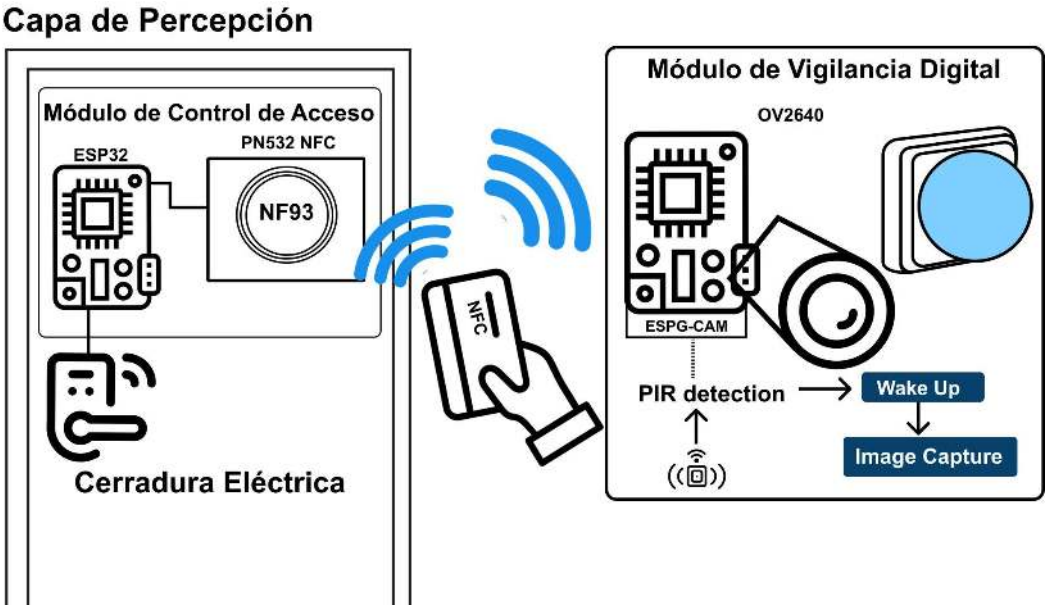


Figura 2: Esquema técnico del nodo sensor basado en ESP32 con integración de lector NFC y sensor PIR.

Fuente: Elaboración propia (2026).

Capa de comunicación

Dado que los entornos industriales pueden presentar conectividad intermitente y ruidos electromagnéticos, el uso de protocolos tradicionales como HTTP resulta ineficiente. La arquitectura propuesta implementa el protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) sobre TCP/IP, utilizando un modelo de publicador/suscriptor. Como señalan Mishra y Kertesz (2020), la eficiencia de MQTT lo hace ideal para aplicaciones de telemetría masiva en tiempo real. El sistema emplea el broker Mosquitto de código abierto, configurado con autenticación y cifrado TLS/SSL (Vieira y Rizzetti, 2023).

Para garantizar una comunicación ligera y eficiente en tiempo real, se implementó un modelo de mensajería cuya lógica de intercambio de tópicos se ilustra en la Figura 3.

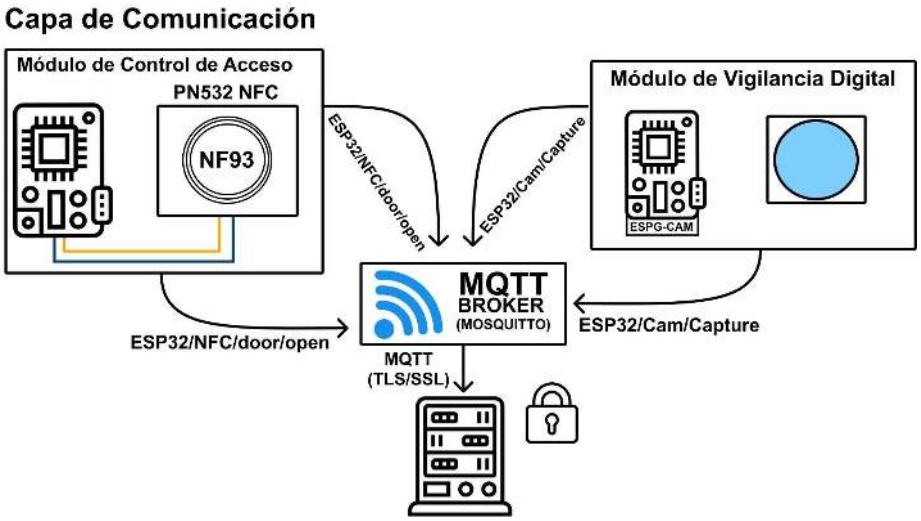


Figura 3: Flujo de mensajería bajo el protocolo MQTT: del nodo sensor al orquestador Django.
Fuente: Elaboración propia (2026).

Para organizar la telemetría y los comandos, se definieron jerarquías de tópicos específicas:

- *esp32NFC/door/open:* Tópico utilizado para la comunicación bidireccional del control de acceso. El nodo publica el UID leído en este tópico. El *backend*, suscrito al mismo o a uno derivado, responde con un payload de confirmación (ej. *"status": "granted", "token": "xyz"*) que el ESP32 interpreta para accionar el servo motor.

- *esp32Cam/capture:* Tópico destinado a la transmisión de los eventos de seguridad visual. Tras la activación del PIR, el ESP32-CAM publica en este tópico una alerta junto con el tamaño del archivo y el *hash* de la imagen. La transferencia binaria de la imagen puede realizarse particionada vía MQTT o mediante un POST HTTP paralelo hacia una URL pre-firmada por el *backend*, priorizando siempre la notificación del evento en tiempo real vía MQTT.

Capa de aplicación y backend

El núcleo lógico y orquestador del sistema se despliega utilizando Django, un *framework* de alto nivel basado Python, reconocido por su robustez arquitectónica (Modelo-Vista-Controlador/Plantilla) (Kumawat et al., 2025). Se caracteriza por los siguientes elementos:

- Inyección SQL: El ORM (*Object-Relational Mapping*) de Django parametriza automáticamente las consultas, neutralizando intentos de inyección.
- *Cross-Site Scripting* (XSS): Las plantillas escapan las variables renderizadas por defecto.
- *Cross-Site Request Forgery* (CSRF): El *middleware* nativo exige y verifica tokens criptográficos para cualquier petición que altere el estado (*POST, PUT, DELETE*), protegiendo las consolas de administración del sistema (Kumawat et al., 2025).

Django actúa como el puente entre el *broker* MQTT y el almacenamiento persistente. A través de procesos asíncronos (usando librerías como paho-mqtt integradas con *Celery* y *Django Channels*), el sistema escucha continuamente los tópicos MQTT. Cuando un evento es recibido, se ejecuta la lógica de validación y se almacena el registro en una base de datos relacional PostgreSQL.

El uso de Django aborda directamente la seguridad del servidor web, un factor crítico en sistemas IoT. El *framework* incluye mecanismos de mitigación nativos contra las vulnerabilidades más críticas (OWASP Top 10), este orquestador central proporciona una interfaz intuitiva para la auditoría y el control de los nodos distribuidos, tal como se observa en la Figura 4.

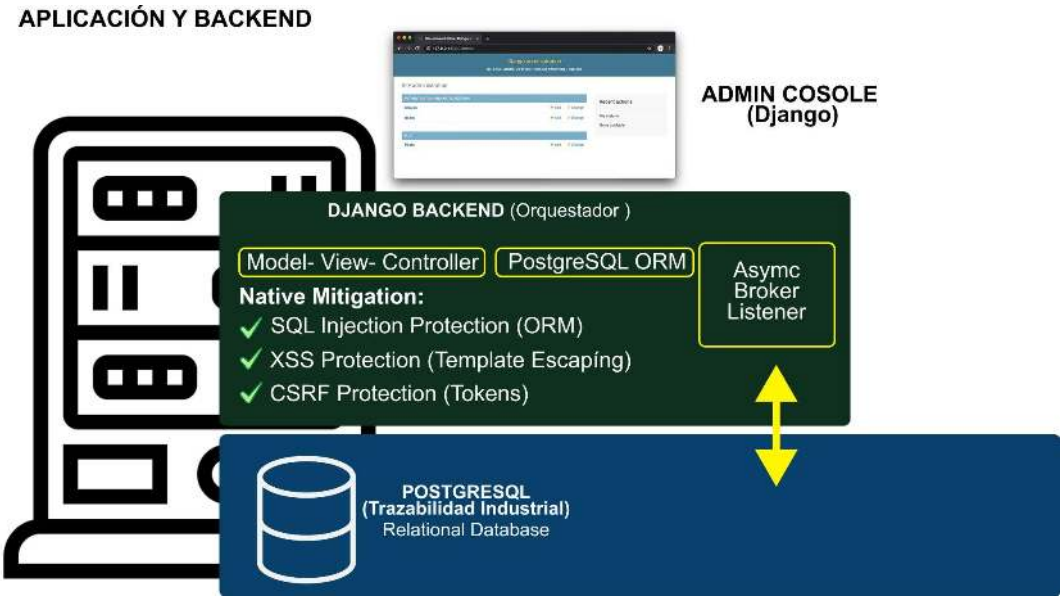


Figura 4: Panel de administración en Django para la supervisión de dispositivos y gestión de acceso.

Fuente: Elaboración propia (2026).

Trazabilidad de eventos en la seguridad industrial

En infraestructuras críticas, la detección de incidentes debe acompañarse de un seguimiento digital riguroso. La trazabilidad de eventos (*audit logging*) es una exigencia estipulada en marcos normativos como la familia de estándares ISA/IEC 62443, la cual rige la ciberseguridad en Sistemas de Control y Automatización Industrial (IACS) (Dragos, Inc., 2023). El artefacto desarrollado implementa una cadena de custodia digital inquebrantable para cada interacción física o digital. Desde el hardware de borde, se implementa la sincronización con servidores NTP (*Network Time Protocol*). Esto asegura que el evento originado en el lector NFC o el sensor PIR lleve una marca temporal unificada y confiable antes de llegar al *backend*.

Cada intento de acceso (exitoso o denegado) y cada fotografía capturada genera un UUID de evento. Adicionalmente, el payload de los datos se somete a una función de *hashing* criptográfico (ej. SHA-256) en la base de datos PostgreSQL. Esto garantiza la integridad referencial; cualquier alteración de la bitácora invalida la cadena de eventos, cumpliendo con los requisitos del Nivel de Seguridad (SL) de la IEC 62443 respecto a la auditabilidad y el no repudio (Barabanov y Makrushin, 2021). Además, este enfoque facilita la trazabilidad necesaria para la digitalización industrial moderna (Beliatis et al., 2021). La capacidad del sistema para generar registros inalterables y detallados permite una reconstrucción precisa de los eventos de seguridad (ver Figura 5), cumpliendo con los requisitos de trazabilidad industrial.

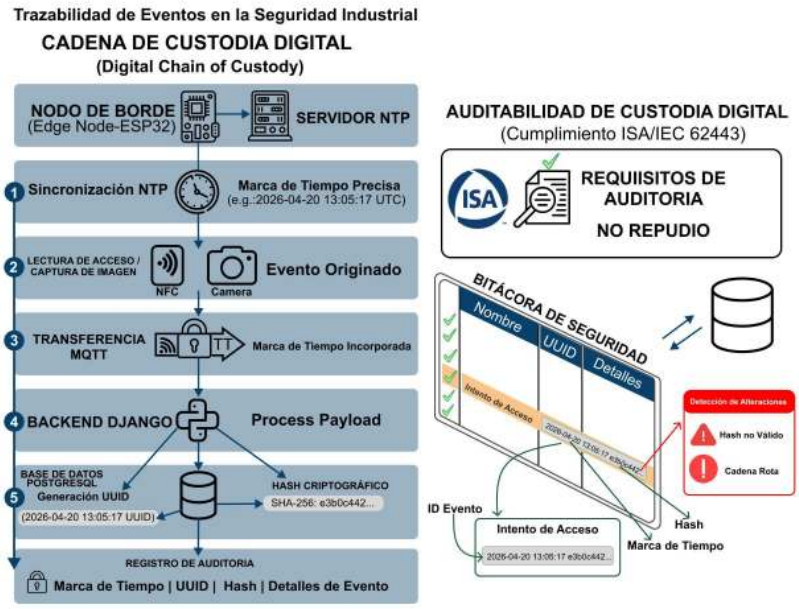


Figura 5: Visualización del registro de eventos (*logs*) para la trazabilidad de accesos y alertas de vigilancia.

Fuente: Elaboración propia (2026).

Evaluación del artefacto (resultados experimentales)

Para validar la viabilidad operativa de la arquitectura propuesta, se ejecutó un plan de pruebas en un entorno controlado. El banco de pruebas consistió en una red Wi-Fi local (802.11n a 2.4 GHz) aislada y sin tráfico de fondo (0 % de contención de red), con un broker Mosquitto y el servidor Django/PostgreSQL desplegados localmente. El objetivo fue aislar el rendimiento intrínseco del hardware (ESP32/ESP32-CAM) y del stack de software frente a los requerimientos de tiempo real de un entorno industrial.

Se estableció como requisito no funcional una latencia máxima de 500 *ms* desde la detección del evento físico (lectura NFC o activación del PIR) hasta el registro inmutable en la base de datos PostgreSQL y la consiguiente respuesta del actuador (cerradura). Los resultados que se muestran en la Tabla 1, de la primera iteración de pruebas arrojaron un rendimiento por debajo de los niveles requeridos, demostrando que la ausencia de tráfico de red no garantiza por sí sola la baja latencia en arquitecturas IoT complejas.

Tabla 1: Resultados de latencia en entorno controlado (iteración 1)

Tipo de Evento (Trigger)	N° de Pruebas	Requerimiento Máximo	Latencia Promedio Obtenida	Desviación Estándar	Estado
Autenticación NFC (Validación UID)	50	$<$ 500 ms	680 ms	±45 ms	No cumple
Activación PIR + Captura Fotográfica	50	$<$ 1000 ms	2150 ms	±320 ms	No cumple
Telemetría Básica (*Keep-Alive*)	100	$<$ 200 ms	110 ms	±15 ms	Cumple

Fuente: Elaboración propia (2026).

Discusión de los hallazgos

El análisis de los cuellos de botella reveló que la degradación del rendimiento no se originó en la capa de transporte MQTT, la cual operó de manera óptima en la red aislada, sino en el procesamiento en los extremos (*Edge* y *Core*).

En el caso del ESP32-CAM, el retraso de 2 segundos se atribuye al tiempo de inicialización del sensor de la cámara (OV2640) tras salir del estado de *Deep Sleep*, sumado al proceso de compresión JPEG por hardware antes de publicar el *payload* en el tópico MQTT. Para las lecturas NFC, el retraso de 680 ms evidenció que las peticiones del orquestador Django se estaban manejando de forma sincrónica. La validación del UID contra la base de datos relacional (PostgreSQL) y la generación del log de auditoría bloqueaban el hilo principal antes de emitir la orden de apertura al ESP32.

Acorde a la metodología DSR, la identificación de este bajo rendimiento condujo a una optimización arquitectónica inmediata. En cuanto al hardware, se modificó el firmware

del ESP32-CAM para mantener el sensor pre-inicializado en un estado de bajo consumo (*Light Sleep* en lugar de *Deep Sleep*), sacrificando marginalmente el ahorro energético para ganar velocidad de reacción en seguridad física. En lo respectivo al software, se evidencia la necesidad de transicionar el *backend* de Django hacia un modelo asíncrono solo utilizando *Django Channels*, delegando el registro de auditoría en PostgreSQL a tareas en segundo plano (*background tasks*) para que el servidor responda al *broker* MQTT con la autorización de acceso de forma casi instantánea.

A pesar de las latencias iniciales, el artefacto validó la hipótesis de eficiencia en costos. El nodo perimetral ensamblado representó un costo inferior a los 15 USD por puerta/punto de acceso. Al utilizar una capa de Software de Código Abierto (OSS) libre de licenciamientos restrictivos, se demostró que es posible construir una barrera de convergencia IT/OT auditable y escalable sin la dependencia económica de las soluciones propietarias tradicionales.

Resultados

El ecosistema de seguridad de la Industria 4.0 está migrando hacia el Software de Código Abierto (OSS) no sólo por razones financieras, sino estratégicas. La arquitectura propuesta está fundamentada enteramente en OSS: núcleo Linux, broker Eclipse Mosquitto, Python/Django y bases de código en C++ para Arduino. Como se observa en la Figura 6, el software de código abierto elimina las "cajas negras" y previene el bloqueo por proveedor.



Figura 6: Software de Código Abierto (OSS) para Soluciones Industriales
Fuente: Elaboración propia. Imagen generada por Gemini Nano (Google, 2026).

A diferencia de las "cajas negras" propietarias, el OSS permite a los equipos de seguridad operativa (OT) auditar el código fuente en busca de puertas traseras, vulnerabilidades latentes

o fugas de datos. La interoperabilidad de protocolos abiertos como MQTT y bases de datos como PostgreSQL garantiza que las industrias puedan expandir o migrar su arquitectura sin depender de los costos de licencia o la hoja de ruta de una sola empresa matriz. Así mismo, la comunidad de código abierto permite parches de vulnerabilidades a una velocidad que frecuentemente supera los ciclos de liberación de los fabricantes corporativos tradicionales.

La implementación física de esta arquitectura abierta se materializa en prototipos de bajo costo y alta eficiencia. En la Figura 7, se observa el esquema de diseño de una unidad de monitoreo basada en el microcontrolador ESP32-Cam, integrando sensores PIR y conectividad WiFi bajo estándares OSS.

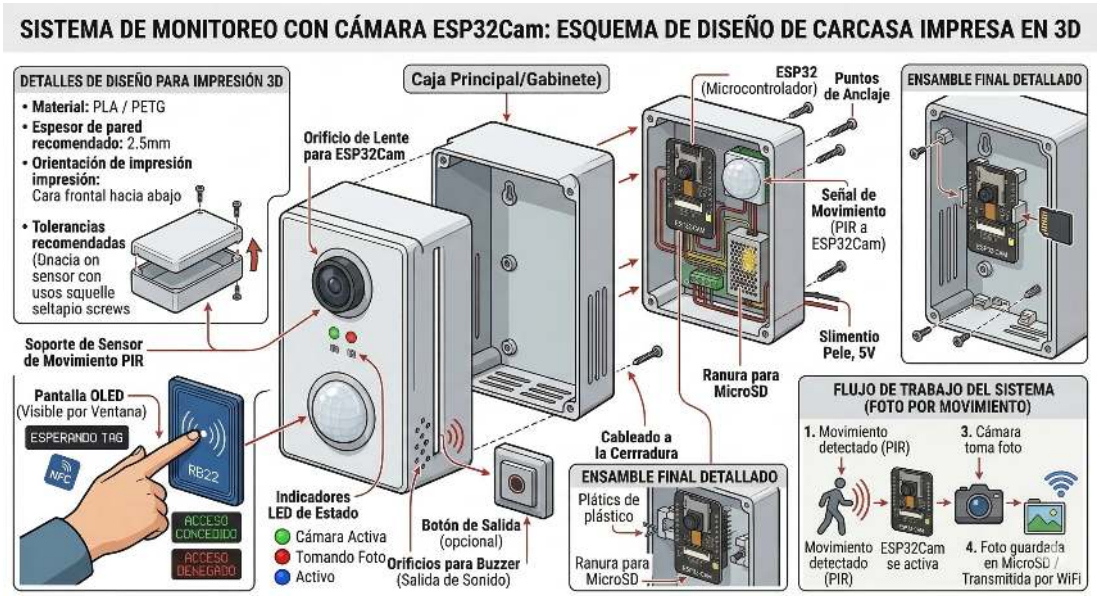


Figura 7: Sistema de Monitoreo Con Cámara SP32Cam.
Fuente: Elaboración propia. Imagen generada por Gemini Nano (Google, 2026).

La evaluación empírica de la arquitectura actual y la identificación de sus cuellos de botella abren líneas de investigación para futuras iteraciones del ciclo DSR. Las líneas de trabajo futuro contemplan la transición hacia una arquitectura asíncrona orientada a eventos mediante la migración del orquestador central a Django 5 integrado con *Channels* y *WebSockets* (ASGI). Asimismo, se propone la optimización energética dinámica en el borde a través de estrategias híbridas de administración de energía para transicionar del estado deep sleep al light sleep sin comprometer la alimentación por baterías. Por último, se plantea la integración de inteligencia artificial para la detección de anomalías mediante la superposición de modelos de *Machine Learning* locales sobre la telemetría inmutable con el fin de predecir comportamientos anómalos o intentos de intrusión.

Conclusiones

La implementación empírica de esta arquitectura bajo la metodología de Ciencia del Diseño (DSR) demuestra la viabilidad técnica de construir sistemas de seguridad IoT robustos para la convergencia IT/OT utilizando exclusivamente *open source software* (OSS). Los resultados experimentales en red validaron que el verdadero desafío de latencia en estas infraestructuras no reside en la capa de transporte ligero gobernada por el protocolo MQTT, sino en el manejo sincrónico del backend al registrar eventos inmutables y en los tiempos de despertar (*wake-up time*) del hardware en el borde.

A pesar de requerir iteraciones asíncronas futuras, el artefacto propuesto probó con éxito sus implicaciones positivas: redujo drásticamente el costo de capital a menos de 15 USD por nodo perimetral, eliminó el riesgo operativo del bloqueo por proveedor (*vendor lock-in*) gracias al uso de licencias abiertas, y garantizó una cadena de custodia digital que cumple con las rigurosas normativas de la IEC 62443.

Las implicaciones de esta arquitectura trascienden el campo de control de acceso y proyectan un impacto directo en otras áreas tecnológicas del entorno industrial. Los hallazgos sobre los retardos de inicialización redefinen las estrategias de programación periférica, obligando a reconfigurar los estados de consumo (como transicionar de *deep sleep* a *light sleep*) para equilibrar la velocidad de respuesta y la eficiencia energética. Al evitar el bloqueo por proveedor a través de protocolos abiertos y licencias permisivas, se facilita a la infraestructura industrial la expansión técnica y la mitigación rápida de vulnerabilidades mediante la auditoría transparente de la comunidad.

Establecer una base de datos de telemetría auditable, inalterable y transparente constituye un pilar para el despliegue futuro de sistemas inteligentes. Como reflexiona Ramírez (2025) la eficacia de los sistemas de aprendizaje automático recae en algoritmos que aprenden según cómo se alimenta la plataforma. Por ende, la transparencia de los datos provista por este modelo de código abierto es el cimiento indispensable para la seguridad industrial del mañana.

Referencias

Barabanov, A., y Makrushin, D. (2021). Security audit logging in microservice-based systems: Survey of architecture patterns. *Voprosy kiberbezopasnosti*, *4*(38), 32-43. https://doi.org/10.21681/2311-3456-2021-2-71-80

Beliatis, M., Jensen, K., Ellegaard, L., Aagaard, A., y Presser, M. (2021). Next generation industrial IoT digitalization for traceability in metal manufacturing industry: A case study of Industry 4.0. *Electronics*, *10*(5), 628. https://doi.org/10.3390/electronics10050628

Ficili, I., Giacobbe, M., Tricomi, G., y Puliafito, A. (2025). From sensors to data intelligence: Leveraging IoT, cloud, and edge computing with AI. *Sensors*, *25*(6), 1763. https://doi.org/10.3390/s25061763

Kumawat, K., Gupta, A., Izmam, M., Khokhar, P., Shrivastava, V., y Pandey, A. (2025). Comprehensive research on Python, Django, and the power of web development libraries. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT)*, *5*(3), 430-434. https://www.ijarsct.co.in/Paper26357.pdf

Mishra, B., y Kertesz, A. (2020). The use of MQTT in M2M and IoT systems: A survey. *IEEE Access*, *8*, 201071-201086. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3035849

Ramírez, J. (2025). Inteligencia Artificial [Sesión de Seminarios]. *Comunidad de aprendizaje de la UPTM Ciencia de los Materiales, CNTO, [Mérida, Venezuela].*

Ungurean, I., y Gaitan, N. (2020). A software architecture for the Industrial Internet of Things—A conceptual model. *Sensors*, *20*(19), 5603. https://doi.org/10.3390/s20195603

Vieira, E., y Rizzetti, T. (2023). *Performance evaluation of an ESPresense/MQTT architecture for real-time locating system* [Trabajo de grado/investigación]. Universidade Federal de Santa Maria, Brasil. https://doi.org/10.5753/errc.2025.17688

Experiencias de Conocimiento Libre

CONOCIMIENTO LIBRE Y LICENCIAMIENTO

Historia y tradiciones del café, desde la práctica del agricultor como docente

História e tradições do café, a partir da prática do agricultor como educador

History and traditions of coffee, from the farmer's perspective as a teacher

Jorge Durán
Escuela Estadal Bolivariana José Eustorgio Rivas, Mérida, Venezuela
jorgeduran8592@gmail.com

Fecha de recepción: 14/07/2026
Fecha de aceptación: 26/09/2026
Pág: 220 – 229
DOI: 10.5281/zenodo.23888819

Resumen

La caficultura tradicional y la pedagogía rural en la parroquia Canaguá (municipio Arzobispo Chacón del estado Bolivariano de Mérida, Venezuela) constituye un fenómeno socio pedagógico donde el sistema socio productivo actúa como un currículo vivo. El propósito de este artículo es analizar la figura del docente-caficultor como un mediador empírico que transmite saberes ancestrales, históricos y agroecológicos a través de la praxis cotidiana. Metodológicamente, la investigación se enmarcó en sistematización de experiencias con enfoque cualitativo, empleando la observación directa y el diálogo para documentar cómo las fases del cultivo se transforman en estrategias didácticas en los cafetales. Los hallazgos develaron que la integración de la geohistoria, la etnomatemática, la agroecología y la tradición oral comunitaria se configuran y reconfiguran como un proceso educativo que articula diferentes unidades curriculares, consolidando la praxis del docente-caficultor como una alternativa socioeducativa para fomentar la identidad cultural local, la ética, el trabajo en equipo y la conservación ambiental. Se concluye que la validación e inclusión del saber del caficultor es el eje dinamizador para dignificación de la ruralidad en los Andes venezolanos y formación integral de la nuevas generaciones.

Palabras clave: caficultura, identidad cultural, pedagogía rural, saberes ancestrales, sistema de producción.

Esta obra está bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0.

Resumo

A cafeicultura tradicional e a pedagogia rural na paróquia de Canaguá (município de Arzobispo Chacón, no estado bolivariano de Mérida, Venezuela) constituem um fenômeno sociopedagógico no qual o sistema socioprodutivo atua como um currículo vivo. O objetivo deste artigo é analisar a figura do docente-cafeicultor como um mediador empírico que transmite saberes ancestrais, históricos e agroecológicos por meio da práxis cotidiana. Metodologicamente, a pesquisa baseou-se na sistematização de experiências com uma abordagem qualitativa, utilizando a observação direta e o diálogo para documentar como as fases do cultivo se transformam em estratégias didáticas nos cafezais. Os resultados revelaram que a integração da geohistória, da etnomatemática, da agroecologia e da tradição oral comunitária configura-se e reconfigura-se como um processo educativo que articula diferentes unidades curriculares, consolidando a práxis do docente-cafeicultor como uma alternativa socioeducativa para promover a identidade cultural local, a ética, o trabalho em equipe e a conservação ambiental. Conclui-se que a validação e a inclusão do saber do cafeicultor constituem o eixo dinamizador para a dignificação da ruralidade nos Andes venezuelanos e para a formação integral das novas gerações.

Palavras-chave: cafeicultura, identidade cultural, pedagogia rural, saberes ancestrais, sistema de produção.

Abstract

Traditional coffee farming and rural pedagogy in the Canaguá parish (Arzobispo Chacón Municipality, Mérida State, Venezuela) constitute a socio-pedagogical phenomenon in which the socio-productive system acts as a living curriculum. This article aims to analyze the role of the teacher-coffee farmer as a mediator who transmits ancestral, historical, and agroecological knowledge through daily practice. Methodologically, the research was framed within the systematization of experiences using a qualitative approach, employing direct observation and dialogue based on shared knowledge to document how cultivation phases transform into territorial didactic strategies. Findings revealed that integrating geohistory, ethnomathematics, and oral tradition into the coffee-growing process links subjects such as biology and mathematics, thereby consolidating the teacher-coffee farmer's practice as a socio-educational alternative that fosters cultural identity, a teamwork ethic, and environmental conservation. The study concludes that validating and including coffee-farming knowledge in curriculum planning serves as a driving force

for dignifying rural life in the Venezuelan Andes and for the holistic development of new generations.

Keywords: coffee farming, cultural identity, rural pedagogy, ancestral knowledge, production system.

A manera introductoria: El café como punto de partida

Históricamente el café ha sido el motor socioeconómico de nuestra tierra, destacando su sabor y su aroma incondicional en cada taza que tomamos. Canaguá es un ecosistema cultural donde el tiempo se mide por las floraciones de café cada año. La caficultura ha dejado de ser una actividad económica para transformarse en un sistema de vida de cada uno de los habitantes de estos parajes andinos. La educación tradicional ha ignorado el valor pedagógico del campo, ya que existe una desconexión total entre el saber científico-académico y el saber ancestral del caficultor.

En el contexto de los Pueblos del Sur de los Andes venezolanos, específicamente la parroquia Canaguá del municipio Arzobispo Chacón (Mérida, Venezuela), que posee una topografía accidentada y un clima de montaña que ha forjado un carácter específico en su gente para la siembra y la producción de plantas de café, este producto no es solo un rubro de exportación o consumo; pues como señalan diferentes teóricos y expertos en la materia, el café es considerado un alimento del sustento diario de los hogares andinos, además de ser un rubro emergente para el turismo centrado en la cultura cafetera (Fonseca et al., 2025; Gaitán, 2018).

Mientras la educación trata de estandarizar la práctica del caficultor en su papel de docente, éste busca implementar la lectura y la escritura creativa para rescatar la historia, tradiciones, procesos de producción y comercialización del café. Esto con el propósito de relatar las experiencias del productor cafetalero desde su visión como docente. No obstante, en la práctica, el caficultor ha llenado este vacío convirtiéndose en un transmisor de cultura. Como se plantea en las bases de la educación andina, la comprensión de la realidad geohistórica local es el primer paso fundamental para que el individuo defina quién es y fortalezca su vínculo con el territorio que habita, por lo que la vinculación de los proyectos productivos con el diseño curricular permite que los estudiantes de las escuelas rurales valoren el trabajo del campo (Cedeño y Jama, 2025).

Con base en las líneas que antecede, se pretende entonces, documentar la práctica del docente en su papel de caficultor, partiendo de cómo el sistema de producción y su historia se convierten en estrategias pedagógicas dentro del aula de clase, promoviendo el pensamiento agroecológico que articule la productividad, la conservación ambiental y a la preservación del

ecosistema, como elementos clave para garantizar el desarrollo rural (Justo et al., 2025; Molano y Valencia, 2026). De esta manera, el cultivo del café puede convertirse en un el eje trasversal del desarrollo de competencias en diversas áreas de la educación como la biología y las matemáticas, contribuyendo así a la formación ciudadana.

Un territorio con historia y aroma a tradición

El café, a nivel mundial, se concibe como un producto consumo masivo, por lo que contribuye con el desarrollo de una sociedad (Ponce et al., 2022; Sandoval, 2020). En el caso particular de la República Bolivariana de Venezuela, considerado un país de tradición cafetera, siendo la bebida del café un hito relevante a nivel cultural, además de tener un papel clave en el aspecto económico de la nación, desde la época colonial. La historia del café en Venezuela comenzó en el siglo XVIII, cuando se introdujo en la región andina, específicamente en el estado Mérida, dado sus condiciones de altitud y clima para producir granos de excelente calidad, siendo la Hacienda La Victoria de Calogero Paparoni, el primer asentamiento de mayor relevación en el cultivo de café en los Andes venezolanos, donde tales condiciones, aunado a la protección de las montañas, dieron origen a un microclima de maduración lenta que potenciaba los atributos organolépticos del grano (Cepeda, 2020).

Históricamente, la organización social de la parroquia Canaguá se ha estructurado en torno a pequeñas parcelas o fincas familiares. La realidad geohistórica local define no solo la economía, sino la personalidad del canagüense: resiliente, observador y profundamente arraigado a su tierra, tal es el caso de Don José de los Santos Molina, quien es recordado como uno de los grAndes impulsores de la caficultura en la zona. Su labor se fundó tanto en el cultivo del café como en la organización de las primeras estructuras de comercialización del producto, lo que permitió trasladar el grano desde lo profundo de los Pueblos del Sur de los Andes venezolanos hasta los mercados nacionales.

Reviste aquí, el hecho de que dicho traslado, por la década de 1950, se realizaba con el arreo de mulas, pues no se contaba con carretera ni vehículos de carga. Las mulas eran distribuidas en grupos de siete cada arreo, llevando consigo una carga o su equivalente a 100 kilogramos de café cada una, cuyo principal destino fue la población de Santa Cruz de Mora. Este transitar de los pobladores de Canaguá, para lograr llevar al mercado el café requería de tres días, al que se le debía añadir un día de descaso y tres días de regreso.

Otro de los personajes importantes que coadyuvaron a elevar la producción de café en la zona rural de Canaguá fue Don Amadeo Uzcátegui: figura relevante en la tecnificación del proceso. Su influencia ayudó a que los productores locales transformarán su visión en la producción de café, al transitar de una agricultura de subsistencia a una producción excedentaria, logrando así que el café de esta localidad compitiera en calidad con el ofertado en la población de Santa Cruz de Mora. Gracias a la gestión de estos personajes, el café

de Canaguá llegó a ser exportado con sello propio, aprovechando los arreos de mulas que atravesaban los páramos de Las Nieves y Las Coloradas, llegando a conectar con el ferrocarril o el puerto de Maracaibo, consolidando una época dorada de arquitectura y progreso para el municipio (Cepeda, 2020).

Con base en esta secuencia de prácticas, la historia del café en Canaguá está ligada a la resistencia y la adaptación. El agricultor que aprendió a leer los suelos, las lluvias, los vientos y las fases lunares, transformó ese conocimiento en una tradición oral. Este proceso de aprendizaje transgeneracional es vital, ya que permite que fomentar en las nuevas generaciones la comprensión, reflexión y análisis de relatos que develan la historia cafetera en el territorio, convirtiéndose este accionar en el eje catalizador de la transformación de los proyectos educativos (García, 2020; Raggio, 2023).

La geohistoria de Canaguá, por tanto, se estudia en la disposición de los cafetales que coronan las montañas del municipio, y en aquellos hombres que luchan día a día por obtener las mejores cosechas cada año. De este modo, el rubro del café emerge como el dinamizador del desarrollo socioeconómico de la parroquia y el municipio y el rescate de patrimonial cafetero como elementos de identidad y arraigo a la cotidianeidad de la ruralidad de los Pueblos del Sur merideño (Duis, 2021).

Pedagogía con sabor a tierra: Un viaje metodológico por la praxis cafetalera

El agricultor de Canaguá utiliza un método pedagógico basado en la observación participante, la experimentación en el terreno y la acción reflexiva-analítica de los saberes que posee, dinámica que se aleja de los modelos tradicionales para situarse al aprendizaje dialógico. En el sistema de producción cafetalero, la formación se articula a través de la interacción comunitaria y el intercambio de experiencias, lo que constituye una manifestación social del desarrollo local donde se construye el conocimiento mediante la internalización y externalización de saberes empíricos.

A pesar de la riqueza del currículo venezolano, la educación formal en el municipio Arzobispo Chacón, aún debe avanzar hacia la sistematización de las experiencias y los saberes adquiridos. Resulta imperativo que las escuelas rurales validen la labor del agricultor como docente, cuya mediación pedagógica se convierta en modelo de formación agroecológicas integral de las nuevas generaciones del municipio (Justo et al., 2025; Ternera y Zapata, 2023). En este escenario, el caficultor como docente actúa como un puente entre el conocimiento técnico y la práctica ancestral, convirtiendo el cafetal en un aula viva y abierta para la transformación socioeducativa.

La fase de germinación, vivero, producción y cosecha como praxis cafetera

La transmisión de los saberes del café de generación en generación en la parroquia Canaguá se ha convertido en un proceso pedagógico propio de la localidad, donde cada una de las fases socioproductivas de su cultivo constituyen un conjunto de contenidos curriculares contextualizados y situados para la formación de las nuevas generaciones canagüenses. De este modo, esta labor educativa se consolida como un constructo teórico-práctico experiencial que articula diferentes áreas del conocimiento.

Bajo esta premisa, el proceso de enseñanza de la jornada cafetalera en la escuela debe iniciar con la selección del germoplasma o grano. El maestro transmite al niño el conocimiento sobre las variedades del café, que existen en la comunidad considerando parámetros como: la selección de una planta, por lo que debe estar sana, libre de plagas y que se encuentre dentro de la cosecha principal; es decir en plena maduración, luego se procede a seleccionar las cerezas que se encuentran en el estrato medio de la rama entre la copa y la bajera; para posteriormente realizar el despulpado del grano de manera manual, y someter el grano a un secado solar por dos días aproximadamente, como tiempo mínimo para café al sol también se puede secar en la sombra, y finalmente, seleccionar el grano óptimo que este en buenas condiciones descartando aquellos que se encuentran en mal estado.

Seguidamente, el niño debe conocer sobre la construcción de viveros netamente necesarios para la siembra y el llenado de bolsas. El vivero se convierte en el espacio donde el cultivo permanecerá por alrededor de unos 45 días aproximadamente para poder obtener un producto de calidad, a partir del manejo de las plántulas dentro del vivero. Durante el llenado de bolsas, los niños aprenden a seleccionar la materia prima, el tipo de tierra y la cantidad que se debe usar por cada bolsa. Así mismo, el agricultor enseña sobre la presencia del llamado rabo de cochino al momento de realizar el trasplante de la planta, lo cual está referido a la forma que toma la raíz retorcida o forma de orqueta en favor de la forma de espada con el propósito de que el niño desarrolle capacidades cognitivas para describir lecciones sobre la fisiología de la planta: la raíz pivotante, los cotiledones y el primer par de hojas verdaderas.

Posteriormente, la praxis del agricultor aborda el manejo del suelo, plagas y enfermedades para garantizar la optimización de las condiciones del terreno necesarias para el crecimiento de las plantas de café, que luego de seis meses en el vivero son trasplantadas al campo para su desarrollo y crecimiento, durante un periodo aproximado de dos años permanece bajo estrictos cuidados, limpieza de malezas, incorporación de abono orgánico como el compost y de nutrientes, así como la siembra de árboles como el guamo para dar sombra al cafetal, al cumplirse este periodo viene la primera floración y su primera cosecha. Este accionar pedagógico fomenta una conciencia agroecológica hacia el cuidado del cafetal y el medio ambiente, desarrollando una ética de cuidado y corresponsabilidad social durante las fases

socio productivas del café.

Tras el rastro del aroma y la ruta maestra de la producción, en el pueblo de Canaguá la cosecha de café comienza a mediados del mes de octubre y se extiende hasta principios de febrero, convirtiéndose esta fase en la más crítica de todo el proceso productivo del café, pues de ella depende la calidad final del producto. En esta fase productiva, el niño junto a otros miembros de la comunidad participa en el proceso de recolección y selección de frutos maduros fruto de color rojo intenso o amarillo, el despulpado, la fermentación aeróbica y anaeróbica mediante el olfato y el tacto, el lavado, el secado y el trillado, lo que requiere de disciplina, cuidado e higiene para lograr obtener la mejor calidad del producto.

Pedagogía crítica de la identidad cafetalera: Café, el lenguaje de los Pueblos del Sur

Siguiendo las tesis de Freire (1997) sobre la educación como práctica de la libertad, el conocimiento no se dicta, se construye. El agricultor cafetero de Canaguá enseña a través de la praxis del conocimiento. La relación entre el docente caficultor y el niño es dialógica y basada en el respeto por los ciclos de la naturaleza durante el proceso de producción del café. La integración de la pedagogía con la historia y la producción cafetera permite transformar un rubro agrícola en un texto social, que los estudiantes y miembros de la comunidad pueden leer y transformar en nuevos constructos teóricos-prácticos convirtiendo su cultivo en una extensión de su vocación pedagógica.

Por ello, el arte de gestionar la tierra con lógica, sabor y aroma a café exige un dominio del cálculo: estimación de densidades de siembra (cantidad de plantas por hectáreas), apreciación de costos por planta (cantidad de café en grano azul que produce una planta) y medición de peso y volumen del llenado de las bolsas en el vivero. Con estas prácticas, el caficultor docente pone en práctica sus saberes y experiencias para conectar el conocimiento con la realidad de la comunidad (Molano y Valencia, 2026; Reyes et al., 2026). De igual manera, esta dinámica pedagógica favorece la preservación del léxico local, términos como chapola, cereza, pergamino, tinto, pasilla, guayoyo y convite forman parte de una estructura lingüística propia de la zona que reconoce el vocabulario técnico y la tradición oral de las historias propias del caficultor como expresión cultural y de identidad rural (Baby et al., 2025; Ternera y Zapata, 2023).

Aunado a las líneas que anteceden, en este proceso pedagógico el calendario cafetalero marca los hitos de la parroquia, donde las celebraciones como el día de San Isidro, la exposición del café en las ferias o la llegada de la zafra, constituyen momentos pedagógicos que buscan resaltar el trabajo de los actores sociales y comunitarios que de manera colaborativa y cooperativa trabajan el campo para mantener el legado ancestral.

El convite en Canaguá representa la máxima expresión de la solidaridad andina y espacio

de encuentro entre sus habitantes. Cuando el caficultor convoca a sus vecinos para la cosecha o la limpieza del cafetal, extiende su práctica pedagógica no formal, donde enseña valores como la reciprocidad, el respecto, la convivencia armónica y trabajo colaborativo y cooperativo. Esta práctica compartida consolida el tejido social del municipio, transformando y transcendiendo la faena agrícola en una actividad de formación ciudadana, fortaleciendo así el sentido de pertenencia comunitaria (García, 2020).

De este modo, el convite se convierte en una estrategia pedagógica en la que la socialización e intercambio de saberes y experiencias sobre los tópicos del café y su recolecta permite a niños, jóvenes, familia y comunidad internalizar y exteriorizar el conocimiento, pues entre coplas y relatos se realiza la labor agrícola (Cervantes y Estrada, 2018). El convite, además promueve un ambiente para reforzar lazos de amistad y confianza entre las familias de la comunidad, en la que el dueño del cafetal ofrece la mejor atención a sus vecinos un desayuno de arepas de trigo con queso ahumado, una buena sopa de arveja con pata de cochino y el pesaje del café en el patio, consolida al convite como una unidad de aprendizaje, pues se aprende sobre ética, matemáticas, historia y agroecología bajo el aroma del café recién colado.

El destino final del café es el hogar, las cafeterías, los restaurantes y cualquier otro espacio destinado para la socialización y el intercambio de conocimiento, saberes y experiencias. En estos espacios, el caficultor y su familia enseñan sobre la relevancia que tiene una alimentación sana fundamentada en el consumo de productos de la propia localidad. Al transformar el grano en bebida, el canagüense cierra el ciclo de valor aprendiendo a valorar el fruto que ha cosechado, por lo que la enseñanza trasciende del cafetal a la mesa que junto a las arepas de maíz pelado y los dulces tradicionales como el majarete o el cabello de ángel forman parte de un currículo gastronómico.

Durante la jornada agrícola, el caficultor relata la historia de sus ancestros, los precios del café en décadas pasadas y las leyendas de los Pueblos del Sur. Esta oralidad es la base del sentido de pertenencia y la autoestima cultural del canagüense. Una de las tradiciones más comunes por estos pueblos andinos, es levantarse y tomar una deliciosa taza de café, así como al llegar un visitante al hogar de cualquier canagüense, por lo que el café no es considerado una simple taza de café, sino que por el contrario forma parte de la cultura venezolana. De ahí que una taza de café resulta en una bebida balanceada, con cuerpo, dulzor y distintos niveles de acidez (Gaitán, 2018), aspectos que hacen de una taza de café una bebida con sabor y aroma por excelencia (Puerta, 1999).

Consideraciones finales: El camino del café desde la praxis docente-caficultora

El café es un producto agrícola con un precio basado en la calidad, por lo que es considerado uno de los cultivos de mayor relevancia e impacto en la agricultura mundial y en

los mercados internacionales. Por ello, la figura del docente-caficultor constituye un vínculo entre el conocimiento y la sabiduría de la tierra, donde el aula transciende a los espacios del cafetal. Al asumir este rol, el educador se convierte en un actor socioeducativo que diversifica sus saberes y experiencias en prácticas beneficiosas para la formación integral de las nuevas generaciones, transformando la teoría en práctica mediante la aplicación de métodos científicos y pedagógicos en el cultivo.

La historia y tradiciones del café en Canaguá son un patrimonio vivo que devela un enfoque educativo alternativo que se fundamenta en los saberes de agricultores-maestros, que muestra una vinculación entre el saber académico formal y la sabiduría ancestral de la tierra, dejando en evidencia que la escuela rural desde el cafetal transciende y se integra a la vida socioeconómica de su comunidad. Por ello, el sistema de producción es visto como una cadena de trabajo y sabiduría que garantiza la permanencia de los Pueblos del Sur.

Solo integrando este saber en el currículo educativo se podrá asegurar un futuro para las comunidades rurales andinas donde la identidad, la ecología y la economía caminen de la mano bajo el aroma de un café bien cultivado. El cultivo del café se ha mantenido como la primera actividad agrícola en muchas regiones de los Andes venezolanos, incluyendo los Pueblos del Sur, donde hoy se divisan hermosos cafetales en sus laderas, valles y mesetas. Esta actividad permite que el docente dignifique el trabajo agrícola, promueva el desarrollo sostenible en sus comunidades y enseñe, a través del ejemplo, que la educación y la producción son motores complementarios para el progreso social y económico de Canaguá y del país.

Referencias

Baby, Y., Auccatoma, R., Coronado, M., y Munaris, S. (2025). El café como símbolo de identidad cultural en las comunidades rurales. Un estudio desde el contexto cubano. *Santiago, Revista de la Universidad de Oriente*, *25*(166), 529-536. https://santiago.uo.edu.cu/index.php/stgo/article/view/28931

Cedeño, A., y Jama, V. (2025). Estrategias pedagógicas para el proceso de enseñanza en aulas multigrado de escuelas rurales. *Polo del Conocimiento*, *10*(10), 991-1005. https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/10583/27772

Cepeda, A. (2020). Por la ruta del café. *Perspectivas*, *7*(14), 95-114. https://perspectivas.unermb.web.ve/index.php/Perspectivas/article/view/285

Cervantes, E., y Estrada, E. (2018). Socialización de conocimientos del café orgánico en el contexto de espacios colectivos de grupos localizados de parentesco tseltales, Tenejapa, Chiapas. *Revista de El Colegio de San Luis*, *8*(15), 47-75. https://dialnet.unirioja.es/ejemplar/480532

Duis, U. (2021). Valores del paisaje en la vida cotidiano de los cafeteros, referentes para la gestión sustentable del patrimonio territorial en el Quindío, Colombia. *Perspectiva Geográfica*, *26*(2), 54-71. https://doi.org/10.19053/01233769.12404

Fonseca, N., Velásquez, M., y Cifuentes, P. (2025). Ruta turística del café como fomento al desarrollo rural en la provincia del Sumapaz en Cundinamarca. *SUMMA*, *7*(1), 1-18. https://doi.org/10.47666/Summa.7.1.2

Freire, P. (1997). *Pedagogía de la autonomía: Saberes necesarios para la práctica educativa*. Siglo XXI Editores.

Gaitán, A. (2018). ¿Una taza de café? Colombia, tierra de café y caficultores. En *De la Geología al Café*. https://doi.org/10.38141/10791/0011_1

García, N. (2020). Educación, memoria histórica y escuela. Contribuciones para un estado del arte. *Revista Colombiana De Educación*, (79), 135-170. https://doi.org/10.17227/rce.num79-8918

Justo, E., Albalat, A., Gutiérrez, J., y Acosta, R. (2025). La Agroecología como Modelo Educativo: un Camino hacia la Sostenibilidad y la Identidad Cultural. *Ibero Ciencias, Revista Científica y Académica*, *4*(3), 1427-1440. https://doi.org/10.63371/ic.v4.n3.a180

Molano, K., y Valencia, L. (2026). La Agroecología Escolar como Estrategia Educativa para Fortalecer la Seguridad Alimentaria en Casabianca, Tolima. *Ibero Ciencias, Revista Científica y Académica*, *5*(1), 274-289. https://doi.org/10.63371/ic.v5.n1.a652

Ponce, L., Morán, J., y Proaño, W. (2022). El café, aprendizaje continuo en los productores cafetaleros de la zona sur de Manabí. *RECIAMUC*, *6*(4), 183-190. https://mail.reciamuc.com/index.php/RECIAMUC/article/view/1077

Puerta, G. (1999). Influencia del proceso de beneficio en la calidad del café. *Cenicafé*, *50*(1), 78-88. http://hdl.handle.net/10778/58

Raggio, S. (2023). ¿Qué le hacen los jóvenes al pasado? Las nuevas generaciones y las políticas de memoria. *Anuario De Historia De La Educación*, *24*(2). https://doi.org/10.51438/2313-9277.2023.24.2.e004

Reyes, C., Varón, D., y Reyes, S. (2026). Las etnomatemáticas como estrategia para legitimar los saberes campesinos en La Campa, Honduras. *Jangwa Pana*, *25*(1), 1-25. https://doi.org/10.21676/16574923.6321

Sandoval, S. (2020). La evolución de los gustos: el consumo del café y el vino como incipiente marca de distinción social. *Estudios Sociales Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, *30*(56), 1-23. https://doi.org/10.24836/es.v30i56.1000

Ternera, D., y Zapata, M. (2023). Estudio comparado sobre la enseñanza de la memoria histórica en Argentina, Chile y México: una revisión literaria. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, *4*(2), 3255-3269. https://doi.org/10.56712/latam.v4i2.833

Reseña

Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL)
Revista Electrónica Conocimiento Libre y Licenciamiento (CLIC), Mérida – Venezuela
ISSN: 2244-7423

Justicia artificial

María Alejandra Lacruz [1]
Manuel Morocoima [2]

Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela[1,2]

alejandra030707@gmail.com
morocoima@gmail.com
DOI: 10.5281/zenodo.23888888



¿Puede una máquina impartir justicia? Esta pregunta articula el *thriller Justicia artificial* (Casal, 2024), dirigido por Simón Casal. En un futuro cercano, el gobierno español convoca un referéndum para introducir THENTE 2, un sistema de inteligencia artificial (IA) destinado a intervenir en la administración de justicia bajo la promesa de hacerla más eficiente y menos dependiente de la política. La consulta genera una confrontación entre el gobierno y la empresa tecnológica vinculada con el proyecto, por una parte, y sectores del poder judicial que apelan al carácter humano de la justicia, por otra. La película lleva el conflicto hacia quién define los criterios que guían una decisión automatizada, quién puede someterlos a revisión y quién asume la responsabilidad por sus efectos. Estas preguntas amplían la discusión más allá del ámbito judicial y alcanzan a cualquier institución que delegue decisiones relevantes en sistemas algorítmicos.

Esta obra está bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0.

La trama se concentra en Carmen Costa, magistrada encargada de auditar THENTE 2 antes de su posible implementación. Su tarea comienza como una evaluación institucional de la herramienta, pero adquiere otra dimensión tras la muerte de Alicia Kóvack, creadora del sistema, en un accidente que despierta dudas sobre los intereses que rodean el proyecto. A medida que Carmen examina la herramienta, descubre que la propuesta original de Alicia, una IA concebida como apoyo de la justicia humana, ha sido desplazada por los intereses de una corporación privada vinculada al poder político. La auditoría deja de limitarse a determinar si el sistema es eficaz y pasa a interrogar quién controla su funcionamiento, qué elementos permanecen fuera del escrutinio público y qué actores adquieren poder cuando una decisión institucional depende de una tecnología que no puede ser examinada plenamente. El conflicto de Carmen con THENTE 2 es, por ello, tanto técnico como político, ya que para evaluar la herramienta necesita acceder a criterios que quienes la controlan no necesariamente están dispuestos a hacer visibles (Casal, 2024).

La investigación en torno a la muerte de Alicia constituye uno de los momentos en que la película vuelve más tangible este conflicto. Su vehículo autónomo toma una decisión sustentada en un "algoritmo ético", programado para priorizar dos vidas aun cuando ello coloque en riesgo una tercera. La escena muestra que automatizar una decisión no elimina su dimensión moral, pues el sistema actúa conforme a una regla previamente definida que privilegia una alternativa sobre otra. Cuando Carmen intenta reconstruir ese criterio, descubre que parte de la información se encuentra protegida por secreto empresarial. Aunque el algoritmo del vehículo no corresponde a THENTE 2, ambos episodios muestran decisiones con consecuencias humanas cuyos fundamentos permanecen parcialmente fuera del alcance de quienes deben evaluarlas. El accidente se convierte en una muestra del problema político central de la película, en el que una decisión puede presentarse como automática aunque los valores que la orientan provengan de elecciones humanas previas.

Desde la perspectiva de las tecnologías libres, este conflicto pone en evidencia la necesidad de comprender cómo funciona una tecnología y bajo qué criterios opera. La auditabilidad de un sistema puede depender, según su arquitectura y finalidad, del acceso al código, a su documentación, a determinados datos y parámetros, así como de los aspectos jurídicos que permiten estudiarlo y modificarlo. La película no establece si THENTE 2 es software libre, pero muestra el problema que surge cuando el análisis de una tecnología encuentra límites impuestos por el control corporativo. Esto plantea la necesidad de definir en qué condiciones una institución puede comprender el funcionamiento de las tecnologías en las que delega funciones relevantes y establecer responsabilidades por sus efectos.

Este planteamiento permite trasladar el problema al ámbito universitario sin equiparar una sentencia judicial con una conclusión científica. Ambos espacios poseen finalidades distintas, pues la sentencia constituye una decisión normativa con consecuencias sobre derechos y responsabilidades, mientras que el conocimiento científico se construye mediante contraste,

revisión y discusión de evidencia. Sin embargo, comparten la exigencia de que la validez de una conclusión no descanse únicamente en la aceptación de un resultado, sino también en la posibilidad de justificar el procedimiento que permitió alcanzarlo. En química analítica, por ejemplo, un modelo quimiométrico de mínimos cuadrados parciales, aplicado a espectros de infrarrojo cercano para estimar la concentración de un principio activo farmacéutico, puede ofrecer un resultado aparentemente razonable aun cuando las muestras y los datos utilizados para calibrarlo sean insuficientes o poco representativos. Aceptar su resultado sin examinar la calibración, la validación y las limitaciones reproduce, en otra escala, el problema que dramatiza *Justicia artificial*, al sustituir la comprensión del proceso por la confianza en el resultado. Esta dificultad se acentúa cuando la herramienta limita el acceso a la información necesaria para evaluar cómo se produjo el resultado. La IA puede apoyar cálculos y análisis, pero la formación científica exige que el estudiante pueda identificar los datos empleados, contrastar el resultado obtenido y justificar la validez de su conclusión.

El uso de la IA en el ámbito universitario plantea preguntas institucionales como qué aplicaciones pueden utilizarse, qué usos deben declararse, qué información puede procesarse y qué decisiones requieren necesariamente supervisión humana. En el ámbito universitario, estas cuestiones se manifiestan en decisiones concretas, como la selección de plataformas tecnológicas, el tratamiento de los datos de estudiantes y docentes y el uso de sistemas automatizados en procesos de evaluación. También plantean la necesidad de determinar quién asume la responsabilidad cuando una recomendación algorítmica interviene en una decisión académica. Miao y Holmes (2024) subrayan, en este sentido, la necesidad de proteger los datos, validar las herramientas de IA generativa y establecer marcos institucionales para orientar su utilización en educación e investigación.

Como obra cinematográfica, *Justicia artificial* acierta al convertir un debate sobre gobernanza algorítmica en un thriller político comprensible para un público no especializado. La auditoría de Carmen, el referéndum y la tensión entre poder judicial, gobierno y empresa tecnológica, permiten dramatizar problemas vinculados con la responsabilidad institucional, el control tecnológico y la falta de transparencia. Sin embargo, al centrar el debate sobre la gobernanza algorítmica en un conflicto entre poderes institucionales, la película deja fuera parte de la complejidad técnica, económica y política que acompaña la implementación de estos sistemas en contextos reales.

Justicia artificial funciona, en consecuencia, como una reflexión sobre los límites de la delegación tecnológica. Su principal advertencia no consiste en atribuir a las máquinas una voluntad independiente, sino en recordar que ninguna automatización elimina las decisiones humanas, los valores ni las relaciones de poder incorporadas a su diseño y utilización. Trasladada a la universidad, esta premisa obliga a pensar la IA como una tecnología cuya adopción modifica prácticas de investigación, aprendizaje y evaluación. El desafío no es excluirla del trabajo académico, sino incorporarla sin abandonar la posibilidad de comprender, cuestionar

y justificar las decisiones realizadas con su mediación. Así como el conflicto de THENTE 2 muestra los riesgos de delegar autoridad sin conservar capacidad de supervisión, la universidad necesita preservar la responsabilidad crítica y la autonomía intelectual sobre las tecnologías que intervienen en la producción de conocimiento.

Referencias

Casal, S. (2024). *Justicia artificial [Película]*. Abano Producións; Tornasol Media; Ukbar Filmes.

Miao, F., y Holmes, W. (2024). *Guía para el uso de IA generativa en educación e investigación*. UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000389227

Boletín

CONOCIMIENTO LIBRE Y LICENCIAMIENTO

Venezuela avanza en cooperación científica, innovación y tecnologías libres

La actividad científica y tecnológica venezolana continúa desarrollándose mediante iniciativas que vinculan la cooperación institucional, la formación de nuevas generaciones y la aplicación del conocimiento a necesidades sociales y productivas. Durante este período, el Ministerio del Poder Popular para Ciencia y Tecnología (MINCYT) y sus entes adscritos impulsaron encuentros de intercambio científico, programas educativos y jornadas de recuperación de infraestructura, junto con experiencias de desarrollo y apropiación de tecnologías libres.



Figura 1: Presentación de Juan Villegas, Presidente de CENDITEL, en el Foro "Cultura Maker y Código Abierto: De la Idea a la Realidad".
Fuente: CENDITEL (2026).

Estas acciones muestran distintas formas de acercar la investigación y las capacidades técnicas a la vida cotidiana. Desde la cooperación internacional hasta la recuperación de equipos médicos y educativos, se configura una agenda en la que participan instituciones públicas, universidades, especialistas y comunidades.

Esta obra está bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0.

Cooperación científica y transformación tecnológica

La cooperación nacional e internacional ocupó un lugar importante en la agenda del MINCYT. Venezuela participó en el II Foro Digital Global, celebrado en Moscú, que reunió a delegaciones de 110 países y más de 700 expertos tecnológicos. Durante el encuentro, el Viceministro para el Desarrollo de las Tecnologías de la Información y la Comunicación, Raúl Hernández sostuvo reuniones con autoridades rusas para abordar posibilidades de colaboración en Inteligencia Artificial y ciberseguridad.

En relación con estas conversaciones, Hernández explicó que ambas naciones han estado trabajando en "el desarrollo, la implementación de políticas en conjunto para la aplicación de la Inteligencia Artificial y la ciberseguridad de una forma segura, en diferentes áreas estratégicas de ambos gobiernos".

La delegación venezolana también visitó el Centro de Innovación Tecnológica Skolkovo, donde conoció experiencias relacionadas con realidad aumentada industrial, aplicaciones de Inteligencia Artificial y tecnologías interactivas.



Figura 2: Raúl Hernández, Viceministro para el Desarrollo de las Tecnologías de la Información y la Comunicación en el II Foro Digital Global.
Fuente: MINCYT (2026).

En el ámbito nacional, la Cumbre Internacional de Gerencia Pública y Economía Digital (CIGED) Venezuela 2026 reunió en Valencia a representantes institucionales, académicos y del sector productivo. Durante el conversatorio sobre tecnología y gobierno se abordaron la

interoperabilidad entre organismos públicos, la simplificación de trámites y el desarrollo de infraestructura digital.

La presidenta del Parque Científico Tecnológico de Venezuela +Ciencia, Mattdign Medina, destacó la importancia de la participación de distintos sectores en estos procesos: "La interoperabilidad institucional no nace solamente del impulso del Gobierno nacional; el impulso tiene que ser de todos".

La cooperación científica también se extendió al ámbito agroalimentario. En un encuentro entre autoridades venezolanas y representantes de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), se revisaron áreas de trabajo relacionadas con seguridad alimentaria, biodiversidad y cambio climático. En este contexto adquirió especial relevancia el reconocimiento internacional otorgado a María Cantalicia de Torres, agricultora de los Andes venezolanos y guardiana de semillas nativas de papa. Sobre su trayectoria, el ministro Yván Gil Pinto destacó que "su labor en la siembra de papa es un valioso aporte a la seguridad alimentaria del país y a la Alianza Científico-Campesina".



Figura 3: María Cantalicia Torres recibe un reconocimiento como una de las "100 Heroínas de la FAO" en el Año Internacional de la Mujer Agricultora.
Fuente: MINCYT (2026).

Esta experiencia se relaciona con el trabajo de la Alianza Científico-Campesina y la Red de Productores Integrales del Páramo (PROINPA), que articulan conocimientos tradicionales y herramientas científicas para preservar la agrobiodiversidad y mejorar las prácticas agrícolas. Al explicar el alcance de esta vinculación, la presidenta del Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología

e Innovación (FONACIT), Carla Contreras, afirmó que "el gran reto ha sido sacar a los investigadores y las investigadoras de los laboratorios y llevarlos directamente a la realidad del campo".

Cayapa Heroica y recuperación de infraestructura científica y social

El Plan Nacional Cayapa Heroica continuó sus jornadas de diagnóstico, mantenimiento y recuperación de equipos en instituciones de salud, centros educativos y laboratorios universitarios. Estas intervenciones constituyen una aplicación directa del conocimiento técnico a la conservación de infraestructura y a la continuidad de servicios esenciales.

En Guárico, especialistas de Fundacite y de la Universidad Nacional Experimental Rómulo Gallegos realizaron labores de inspección y mantenimiento de equipos utilizados en el análisis de suelos y aguas. En Portuguesa, las acciones desarrolladas en el Centro de Diagnóstico Integral Villas del Pilar incluyeron el mantenimiento de dispositivos médicos y la corrección de una falla eléctrica que había mantenido inoperativa la Unidad de Terapia Intensiva durante siete años.



Figura 4: Especialistas de Fundacite Sucre participan en el Plan Nacional Cayapa Heroica. Fuente: MINCYT (2026).

Por su parte, en Carabobo se recuperaron equipos de atención médica y climatización del CDI Los Jarales. En el estado Sucre, las jornadas permitieron restablecer el funcionamiento de microscopios, instrumentos de laboratorio, computadoras Canaima y otros dispositivos destinados a instituciones educativas y asistenciales.

Educación científica y formación de nuevas generaciones

La promoción de vocaciones científicas mantuvo su presencia en las actividades desarrolladas por el MINCYT. A través del Programa Nacional Semilleros Científicos y de las instituciones vinculadas al Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, se impulsaron encuentros educativos, experiencias prácticas y espacios de participación juvenil.

Entre las actividades del período destacó la culminación de las primeras Olimpiadas Venezolanas de Nanotecnología 2026, que registraron 3.986 jóvenes inscritos a escala nacional, de los cuales fueron seleccionados 100 finalistas. Durante la clausura, la Viceministra para la Comunalización de la Ciencia para la Producción, Danmarys Hernández, expresó: "Cada uno de ustedes ya es un ganador por haber llegado hasta aquí, representando a los 3986 jóvenes inscritos a nivel nacional".



Figura 5: Danmarys Hernández, Viceministra para la Comunalización de la Ciencia para la Producción, en la clausura de las primeras Olimpiadas Venezolanas de Nanotecnología.
Fuente: MINCYT (2026).

La competencia propició el intercambio de proyectos estudiantiles y el acercamiento de los participantes a centros de investigación y universidades, favoreciendo su interés por las disciplinas científicas.

Estas experiencias incorporaron actividades de observación, experimentación y trabajo colaborativo, acercando a niños, niñas y jóvenes a distintas disciplinas científicas. Asimismo, los Gabinetes Estadales de Gestión e Integración Territorial contribuyeron a coordinar iniciativas formativas y proyectos tecnológicos vinculados con las necesidades de las comunidades.

Tecnologías libres y cooperación técnica

En el ámbito del desarrollo tecnológico institucional, CENDITEL avanzó en actividades relacionadas con la apropiación de tecnologías libres y la formación especializada de su personal.

Una de estas experiencias fue el levantamiento de requerimientos realizado en el Instituto Autónomo Municipal de la Cultura, como paso previo a la instalación del sistema KAVAC. Durante la jornada se evaluaron las condiciones de conectividad, redes, equipos e infraestructura informática para determinar las adecuaciones necesarias. KAVAC es una herramienta de gestión administrativa desarrollada en Venezuela bajo estándares libres y de código abierto. Su implementación está orientada a facilitar la organización de la información y la digitalización de procesos institucionales, con posibilidades de adaptación a los requerimientos de cada organismo.

En materia de cooperación técnica, trabajadores de las áreas de Hardware y Soporte Tecnológico de CENDITEL participaron en una jornada de inducción en Sistemas Tecnológicos VULTUR. La actividad estuvo dedicada al montaje y desmontaje de componentes electrónicos de montaje superficial (SMD) sobre tarjetas de circuito impreso (PCB), incluyendo procedimientos asociados a la aplicación de pasta de soldadura y su tratamiento térmico.



Figura 6: Jornada práctica de cooperación técnica en Sistemas Tecnológicos VULTUR. Fuente: CENDITEL (2026).

Este intercambio de conocimientos contribuye a la preparación del personal en procedimientos especializados de electrónica, relevantes para las labores de diagnóstico, mantenimiento y reparación de dispositivos tecnológicos. Asimismo, guarda relación con las intervenciones de Cayapa Heroica, donde la experiencia técnica resulta fundamental para atender equipos de diferentes niveles de complejidad.

A esta labor se suma la participación de CENDITEL en Cayapa Heroica, a través de la atención al área de Radiología del Seguro Social de Mérida. Personal especializado de la institución realizó labores de diagnóstico y reparación del equipo central de radiografía, con el propósito de contribuir a la continuidad del servicio. Según la información suministrada por el personal del centro, aproximadamente 80 pacientes son atendidos diariamente en esa área.



Figura 7: Personal de CENDITEL repara el equipo central de radiografía del Seguro Social de Mérida.

Fuente: CENDITEL (2026).

La experiencia de Mérida refleja la relación entre las políticas nacionales de recuperación tecnológica y el trabajo especializado desarrollado desde las instituciones regionales. El diagnóstico de fallas, el mantenimiento y la reparación contribuyen a prolongar la vida útil de equipos fundamentales para la atención sanitaria, la educación y la investigación.

Una agenda científica vinculada con las necesidades del país

Las actividades desarrolladas durante el segundo semestre del año reflejan la diversidad de ámbitos en los que intervienen la ciencia y la tecnología. La cooperación internacional

abre espacios para el intercambio de conocimientos; la formación científica acerca nuevas generaciones a la investigación; y las jornadas de recuperación tecnológica contribuyen a mantener servicios e infraestructura de interés público.

Desde CENDITEL, las experiencias con KAVAC, la capacitación técnica en VULTUR y la participación en Cayapa Heroica se integran a esta agenda mediante aplicaciones concretas del conocimiento y el trabajo colaborativo.

Estas iniciativas evidencian la importancia de articular instituciones, comunidades y personal especializado para desarrollar soluciones tecnológicas, compartir saberes y atender necesidades del territorio. La relación entre formación, investigación y aplicación práctica ofrece oportunidades para ampliar el alcance social de la actividad científica venezolana.

María Eugenia Acosta
Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres
Mérida, Venezuela
macosta@cenditel.gob.ve
DOI: 10.5281/zenodo.23888973


CONOCIMIENTO
LIBRE Y LICENCIAMIENTO