

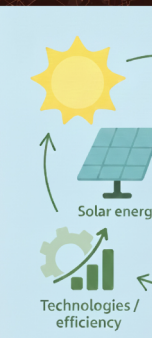
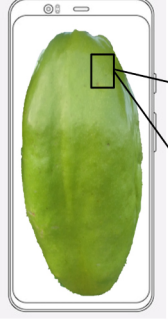
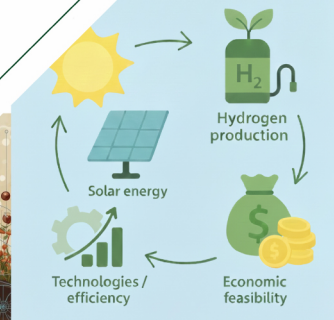


**UTEQ**  
UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE  
QUEVEDO

Revista

# InGenio

Científica y Tecnológica



eISSN: 2697-3642

**Volumen 9, Número 1**  
**Enero 2026**

# Índice de contenido

Transformación urbana y apropiación del espacio público en la Avenida 7 de Octubre, Quevedo - Ecuador <i>(Urban Transformation and Public Space Appropriation on Avenida 7 de Octubre, Quevedo – Ecuador)</i> .....	1
Kelly Macías Chan, Cristina Suárez Loor y Eddyn Macías Chan	
Revisión de la literatura para el conteo de unidades formadoras de colonias en microorganismos mediante visión artificial <i>(Literature Review for Counting Colony-Forming Units in Microorganisms Using Artificial Vision)</i> .....	18
Luis Jiménez Villa, María Alejandre Apolinar, Virginia Lagunes Barradas y Miguel Hidalgo Reyes	
Visión artificial para el diagnóstico de suelos cafetaleros: revisión sistemática de la literatura <i>(Machine Vision for the Diagnosis of Coffee Soils: A Systematic Literature Review)</i> .....	32
Aldrich Irisson Aburto, María Alejandre Apolinar, Hugo Amores Pérez y Yadeneyro de la Cruz Elizondo	
Rapid Assessment of Badea ( <i>Passiflora quadrangularis</i> L.) Maturity Degree by Digital Image Analysis and Multivariate Statistical Techniques <i>(Evaluación rápida del grado de madurez de badea (Passiflora quadrangularis L.) mediante análisis de imágenes digitales y técnicas estadísticas multivariantes)</i> .....	49
Luis Egas, Gina Guapi y Maribel Quelal-Vásquez	
Camino al hidrógeno verde solar: revisión literaria de tecnologías, eficiencia y viabilidad económica <i>(Pathway to Solar Green Hydrogen: A Literature Review of Technologies, Efficiency, and Economic Feasibility)</i> .....	60
Galo Padrón-Andrade, Estefanía Pesántez-Gahuancela y Danny Ochoa-Correa	
Integration of OSPF and SNMP for Network Monitoring and High Availability: Experimental Evaluation <i>(Integración de OSPF y SNMP para supervisión y alta disponibilidad de redes: evaluación experimental)</i> .....	87
Holger Santillán, John Arellano, Bryan Catota y Peregrina Wong	
Evaluación del efecto de la duración del sismo en la respuesta estructural de un sistema SDOF <i>(Evaluation of the Effect of Earthquake Duration on the Structural Response of an SDOF System)</i> .....	113
Hugo Latorre Aizaga, Jonás Molina Pastáz, Brandon Arguello Molina y Félix Cunduri Cunduri	
Mejora de las inspecciones de 100 horas en aeronaves agrícolas Thrush S2R-T34 mediante mantenimiento ajustado <i>(Enhancement of 100-Hour Inspections on Thrush S2R-T34 Agricultural Aircraft through Lean Maintenance)</i> .....	125
John Cajamarca Guerrero y Rodger Salazar Loor	

# Transformación urbana y apropiación del espacio público en la Avenida 7 de Octubre, Quevedo - Ecuador

## *(Urban Transformation and Public Space Appropriation on Avenida 7 de Octubre, Quevedo – Ecuador)*

Kelly Valentina Macías Chan<sup>1</sup>, Cristina Paola Suárez Loo<sup>1</sup>, Eddyn Adrián Macías Chan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador

<sup>2</sup> Profesional Independiente

*kmaciasc4@uteq.edu.ec, csuarezl@uteq.edu.ec, adrian-eddyn@hotmail.com*

**Resumen:** Este estudio analiza los resultados de la innovación urbana en la apropiación del espacio público en la Avenida 7 de Octubre, en Quevedo, Ecuador. Las intervenciones de regeneración urbana en esta avenida modificaron su estructura sin considerar las necesidades de sus usuarios, lo que generó problemas de inaccesibilidad, sobreexposición climática y deterioro del mobiliario. Se implementó una metodología en tres fases: (1) análisis de dinámicas peatonales, (2) evaluación de las condiciones físicas y funcionales del espacio público y (3) propuesta de lineamientos de diseño urbano. Los efectos indican que la avenida no cumple con los estándares de habitabilidad, lo que limita la permanencia y la interacción de los ciudadanos. Se concluye que las intervenciones urbanas deben priorizar el diseño centrado en el peatón para fomentar la apropiación y el uso sostenible del espacio público.

**Palabras clave:** Renovación urbana, espacio público, movilidad peatonal, habitabilidad urbana, vida urbana.

**Abstract:** This study analyzes the results of urban innovation in the appropriation of public space in Avenida 7 de Octubre in Quevedo, Ecuador. Urban regeneration interventions in this avenue modified its structure without considering the needs of the users, which generated problems of inaccessibility, climatic overexposure and deterioration of furniture. A three-phase methodology was implemented: (1) analysis of pedestrian dynamics, (2) evaluation of the physical and functional conditions of the public space, and (3) proposal of urban design guidelines. The effects indicate that the avenue doesn't comply with habitability standards, which limits the permanence and interaction of citizens. It is concluded that urban interventions should prioritize pedestrian-centered design to encourage appropriation and sustainable use of public space.

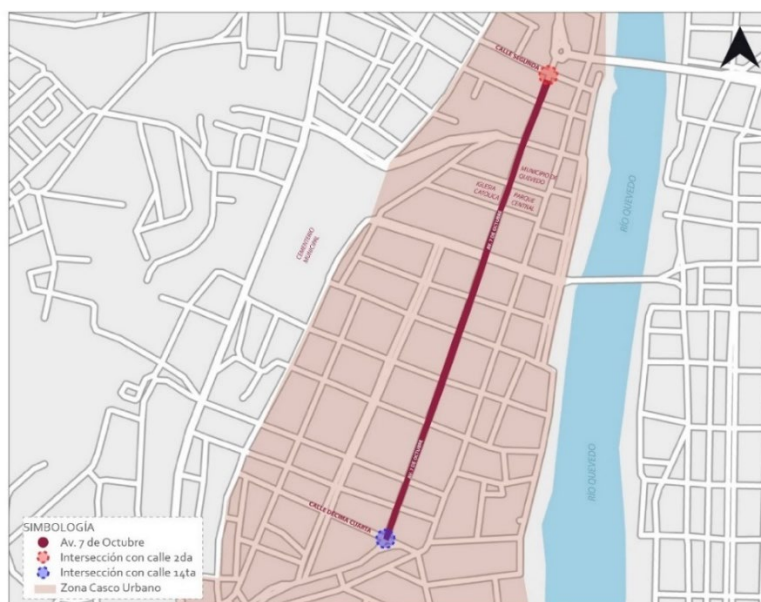
**Keywords:** Urban renewal, public space, pedestrian mobility, urban habitability, urban life.

## 1. INTRODUCCIÓN

El espacio público constituye un elemento fundamental en la organización urbana de las ciudades, ya que es el entorno donde se desarrollan las interacciones sociales y la vida urbana [1]. Su diseño y gestión influyen directamente en la calidad de vida de los ciudadanos, permitiendo o limitando la apropiación de estos lugares por parte de sus usuarios [2]. La regeneración urbana, entendida como un proceso de intervención en el espacio público orientado a su revitalización, en muchas ocasiones ha generado más conflictos que soluciones, debido a que estas intervenciones

no siempre consideran las necesidades reales de los habitantes ni las dinámicas sociales preexistentes [3].

El presente estudio tiene como objetivo analizar el efecto de la transformación urbana sobre la apropiación del espacio público en la Avenida 7 de Octubre en Quevedo (ver Figura 1). Este espacio público, cuya ubicación se encuentra en el centro de la ciudad, es de carácter predominantemente comercial e históricamente ha sido un importante punto de encuentro para los quevedeños. Este espacio público permitía a sus usuarios permanecer y realizar diversas actividades, mismas que iban desde disfrutar de la sombra de los árboles en un momento de descanso, hasta realizar compras de todo tipo. En el año 2017, tras la ejecución del proyecto de regeneración urbana, en lugar de mejorar la calidad del espacio público, se generaron diversos problemas urbanos como la falta de accesibilidad, la sobreexposición a factores dinámicos adversos, la destrucción del arbolado urbano, entre otros [4]. Estos cambios han afectado la manera en que los ciudadanos utilizan y habitan este espacio, dificultando su apropiación y reduciendo su vitalidad urbana.



**Figura 1.** Mapa de ubicación de la avenida 7 de octubre, Quevedo.

La calidad de este estudio radica en la necesidad de comprender cómo los habitantes de la ciudad perciben y se relacionan con el espacio público tras una intervención urbana. La apropiación de estos espacios no se limita únicamente a la presencia física de los ciudadanos, sino que también implica una construcción simbólica y social del lugar, donde confluyen experiencias, significados y formas de uso cotidiano [5]. Al analizar las dinámicas peatonales y evaluar las condiciones físicas actuales de la Avenida 7 de Octubre, será posible identificar los factores que obstaculizan su habitabilidad y, a partir de ello, establecer lineamientos estratégicos de diseño que potencien su uso efectivo y fortalezcan su apropiación colectiva. Con ello, se busca no solo mejorar la calidad del espacio urbano, sino también consolidar su función como escenario activo de la vida pública.

Los resultados de esta investigación no solo contribuirán al desarrollo de estrategias de diseño para la avenida 7 de Octubre, sino que también servirán como referencia para futuras intervenciones en espacios públicos de características similares en Ecuador y América latina. Se busca con ello generar un modelo de intervención que priorice la calidad de vida de los ciudadanos y la sostenibilidad urbana, garantizando que las transformaciones del entorno construyan una ciudad más habitable y apropiable para sus habitantes.



## 2. BASE CONCEPTUAL

El rediseño urbano es un proceso complejo que impacta no solo en la morfología de las ciudades, sino que también en la relación entre los ciudadanos y su entorno construido. En Latinoamérica, estos procesos han generado innovaciones que, en muchos casos, han reducido la apropiación del espacio público por parte de los habitantes [3]. Este capítulo revisa los principales apuntes teóricos que fundamentan el análisis de la transformación urbana y su efecto en la habitabilidad y el sentido de pertenencia en los espacios públicos.

### 2.1. Espacio público, habitabilidad y regeneración urbana

El diseño del espacio público representa un papel fundamental en la construcción de la identidad urbana, al incidir directamente en la interacción social, la habitabilidad y la apropiación simbólica del entorno. Un espacio bien concebido debe integrar accesibilidad, confort, inclusión y seguridad, condiciones que no solo facilitan la permanencia de los usuarios, sino que también refuerzan los vínculos sociales y culturales con el lugar [6], [7]. Las dinámicas peatonales, como expresión de vitalidad urbana, se ven condicionadas por la calidad del diseño, la presencia de mobiliario, la seguridad y el confort ambiental, factores que pueden fortalecer o debilitar la vida pública [8].

En este contexto, la apropiación del espacio se configura como un proceso tanto físico como teórico, donde los ciudadanos desarrollan sentidos de pertenencia basados en la memoria y el uso cotidiano [5]. Sin embargo, los procesos de regeneración urbana en América Latina, muchas veces enfocados en la valorización del suelo y la estética visual, tienden a ignorar estas dinámicas sociales. Esto puede resultar en intervenciones que, si bien transforman el espacio físico, debilitan la identidad y cohesión social del lugar [9], [10].

### 2.2. Caso de estudio: la Avenida 7 de Octubre, Quevedo

En el caso específico de la Avenida 7 de Octubre, la intervención de regeneración urbana implementada en 2017 transformó su estructura física sin considerar las dinámicas de apropiación social preexistentes (ver Figura 2). Esta omisión ha derivado en problemas de accesibilidad, falta de confort térmico y escasez de mobiliario urbano adecuado, lo que ha provocado una disminución de la vida urbana en la zona, afectando negativamente la interacción social y la permanencia de los usuarios. Para revertir esta situación, resulta fundamental adoptar estrategias de diseño que prioricen la inclusión, la habitabilidad y la sostenibilidad urbana, en sintonía con las necesidades reales de la ciudadanía.



**Figura 2.** Vistas aéreas del antes y después de la intervención de la regeneración urbana.

### 3. METODOLOGÍA

El presente artículo adoptó un enfoque metodológico estructurado en tres fases para analizar la transformación urbana y su efecto en la apropiación del espacio público en la Avenida 7 de Octubre, Quevedo. La metodología empleada combinó observación directa, encuestas estructuradas y análisis comparativo con estudios de referencia en América Latina, como los casos de la Avenida José Larco en Lima, Perú [11], la Avenida Carabobo en Medellín, Colombia [12] y la Avenida Monsenhor Tabosa en Fortaleza, Brasil [13], los cuales han sido reconocidos por su enfoque hacia la regeneración urbana y la priorización del peatón. A continuación, se detallan las estrategias utilizadas en cada fase del proceso de investigación.

#### 3.1. Análisis de las dinámicas peatonales

Para comprender cómo los usuarios interactúan con el espacio público de la Avenida 7 de Octubre, se realizó una observación directa no participativa, registrando las actividades de los peatones en distintos sectores de la avenida. La observación se llevó a cabo en cuatro tramos definidos de la avenida, denominados Tramo A, Tramo B, Tramo C y Tramo D (ver Figura 3), cada uno compuesto por seis cuadras y con una extensión aproximada de 970 metros.



**Figura 3.** Implantación de la Avenida 7 de Octubre dividida en tramos.

El análisis se realizó a partir de una ficha de observación estructurada (ver Figura 4), que permitió registrar aspectos claves como:

- Actividades desarrolladas (caminar, permanecer, descansar, comprar, conversar, etc.).
- Patrones de movilidad peatonal (zonas de alta y baja concentración de personas).
- Uso del mobiliario urbano (bancas, paradas de buses, áreas de descanso).
- Interacción con el contexto (espacios comerciales institucionales y culturales).

#### Aplicación del instrumento

La observación se realizó en tres franjas horarias representativas de los distintos usos de la avenida.

- 1.- Mañana (07:00 – 10:00): mayor flujo de personas que se dirigen a sus trabajos o instituciones educativas,
- 2.- Mediodía (12:00 – 14:00): período con actividad comercial intensa y mayor uso del mobiliario urbano.
- 3.- Tarde (16:00 – 19:00): incremento de la movilidad urbana y uso del espacio por parte de grupos familiares.

Los datos obtenidos se representaron mediante mapas de actividad peatonal para cada tramo, permitiendo identificar las zonas con mayor y menor interacción urbana (ver Figura 5).

FICHA DE OBSERVACIÓN DEL ESPACIO PÚBLICO					
Avenida 7 de Octubre, Quevedo					
FECHA DE ELAB:	7A"			ELABORADO POR:	
TRAMO:	DESDE CALLE SEGUNDA HASTA CALLE QUINTA			ARQ. KELLY MACÍAS GHAN	
<p>P1- X-670886.292 Y-9886683.392 P2- X-670820.695 Y-9886771.762</p>					
SIMBOLOGÍA	CONCENTRACION DE PERSONAS	TIPOS DE COMERCIO FORMAL	COMERCIO INFORMAL	INST. MUNICIPAL	EQ. RECREACIONALES
	ALTA	ROPA		CENTROS COMERCIALES	EQ. CULTO
	MEDIA	ALIMENTOS	INST. BANCARIAS	HOTELES	OTROS
	BAJA	FERRETERIAS	EQ. ADMINISTRATIVOS	INST. SALUD	
	AC. CELLULARES				
	IMPORTADORAS				
	OTROS				
ESTANCIAS	ACTIVIDADES IDENTIFICADAS	OBSERVACIONES	REGISTRO FOTOGRAFICO / SITUACIONES DE IMPORTANCIA MAYOR		
DE PIE					
SENTADO (A)					
CAMINANDO					

Figura 4. Formato de Ficha de Observación.



Baja concentración de personas

Alta concentración de personas

Figura 5. Ocupación del espacio público en la Avenida 7 de Octubre.

#### Instrumentos utilizados:

- Ficha de observación estructurada (ver Figura 4).
- Registro fotográfico y mapeo de actividades peatonales.
- Comparación de dinámicas en distintos horarios y sectores de la avenida.

### 3.2. Evaluación de habitabilidad del espacio público

Con el objetivo de determinar si la Avenida 7 de Octubre cumple con las condiciones necesarias para ser un espacio público habitable, se aplicó un análisis basado en indicadores de calidad urbana propuesta por Páramo *et al.* [7]



Para esta fase, se utilizó una ficha de evaluación del espacio público (ver Figura 6), en el cual se analizaron los siguientes aspectos:

FICHA DE EVALUACIÓN DE LA AV. 7 DE OCTUBRE, QUEVEDO						
FECHA DE ELAB:	DESDE CALLE SEGUNDA HASTA CALLE QUINTA					ELABORADO POR: ARO KELLY MACÍAS
INDICADOR	DESCRIPCIÓN (A evaluar)	EXISTENCIAL / POSIBILIDAD		ESTADO		
		SI	NO	M	R	B
CATEGORÍA:		DINÁMICAS AMBIENTALES				
Elementos naturales	Vegetación alta					
	Vegetación baja					
Cambios Climáticos (protección)	Elementos de protección (parasoles, cubiertas, etc.)					
Clima de la ciudad	favorece o no a la estancia y disfrute			/		
Smog	El smog que se percibe				/	
Publicidad visual exterior	Contaminación visual				/	
Publicidad auditiva exterior	Bocinas, altavoces, musica alta, etc				/	
Libre de humo de fumadores	Libre de humo de cigarrillos				/	
Libre de malos olores	basura, alcantarillas, etc				/	
CATEGORÍA:		MOVILIDAD Y ACCESIBILIDAD				
El estado de la malla vial	Estado actual vial		/			
Accesibilidad a los espacios públicos desde los medios de transporte	Posibilidad de acceder en transporte público				/	
Rampas	Rampas que faciliten el desplazamiento de coches para bebés o personas con discapacidad física					
Zonas peatonales que existen actualmente	Posibilidad de desplazarse libremente sin chocar con otras personas u objetos.					
IMPLANTACIÓN						SIMBOLOGÍA
						* / * = NO APLICA
ESTADO: MALO (M); REGULAR (R); BUENO (B); EXCELENTE (E)						

Figura 6. Formato de la Ficha de evaluación del espacio público.

Indicadores evaluados:

- **Condiciones ambientales:** vegetación, sombra, calidad del aire.
- **Movilidad y accesibilidad:** rampas, señalización, continuidad peatonal.
- **Infraestructura y mobiliario:** estado de bancas (ver Figura 7), iluminación, pavimento.
- **Seguridad y percepción:** iluminación nocturna, presencia de vigilancia.

hase



Figura 7. Mobiliario público destruido entre Avenida 7 de Octubre y Calle Octava.



Además, se aplicó una encuesta estructurada a 96 usuarios utilizando un muestreo aleatorio simple. El objetivo fue evaluar la habitabilidad del espacio público desde la perspectiva de sus usuarios, con el fin de obtener una perspectiva fiel a su experiencia y conocer los efectos que la regeneración urbana ha causado en las formas de habitar dicho espacio. La encuesta fue diseñada con base en los objetivos del estudio, fue aplicada de forma directa. El instrumento consistió en preguntas cerradas orientadas a valorar aspectos específicos del entorno y los datos fueron sistematizados y analizados permitiendo identificar patrones sobre cómo las personas perciben y experimentan el espacio. Entre los aspectos abordados en la encuesta se incluyen el tiempo de permanencia, la frecuencia de tránsito peatonal, los factores ambientales, la calidad del mobiliario y de la estructura física, entre otros.

### 3.3. Propuesta de lineamientos estratégicos de diseño

Para esta fase se llevó a cabo un estudio de casos, seleccionados por compartir características similares con el objeto de estudio. Las intervenciones urbanas analizadas fueron: la Avenida Larco, en Lima, Perú; la Avenida Carabobo, en Medellín, Colombia; y la Avenida Monsenhor Tabosa, en Fortaleza, Brasil. Estas intervenciones fueron escogidas debido a sus similitudes en términos de actividad comercial y procesos de regeneración urbana, y fueron evaluados de acuerdo a las estrategias implementadas en cada uno de ellos, enfocadas en:

- **Confort térmico:** uso de arborización y estructuras de sombra.
- **Movilidad y accesibilidad:** expansión de aceras y reducción de impacto vehicular.
- **Seguridad urbana:** iluminación y reconfiguración del espacio público.

Con la información obtenida de las fases anteriores, así como a partir del estudio de casos desarrollado en esta fase, se procedió a la elaboración de una matriz de estrategias de diseño, mismas que están orientadas a favorecer la apropiación del espacio público por parte de sus usuarios.

La metodología utilizada en este estudio puede replicarse en otros espacios urbanos mediante la adaptación de los indicadores de habitabilidad al contexto específico de cada área de estudio. La combinación de observación directa, encuestas y análisis comparativo permite evaluar de manera integral la relación entre la regeneración urbana y la apropiación del espacio público.

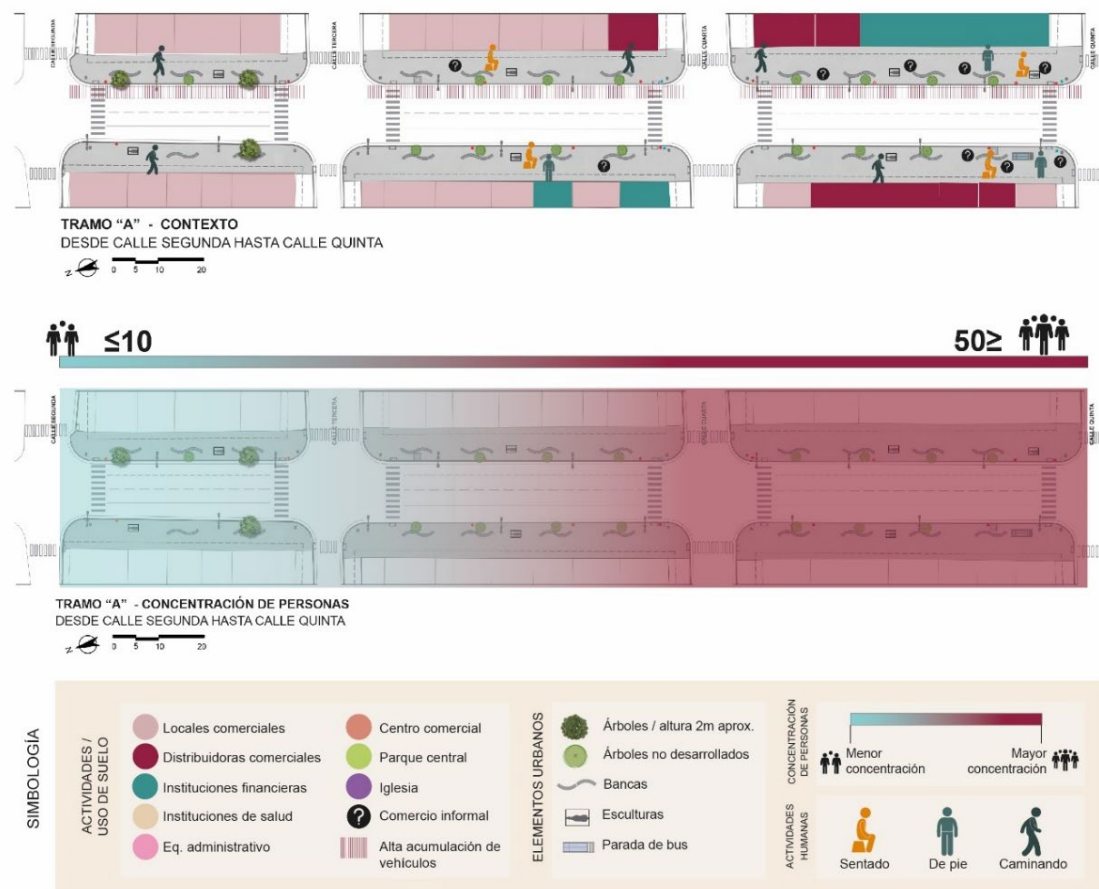
Los datos recolectados y la estructura metodológica ofrecen una base sólida para futuras investigaciones en entornos urbanos similares, garantizando la posibilidad de aplicar y ajustar los lineamientos estratégicos según las condiciones específicas de cada ciudad.

## 4. RESULTADOS

A partir de la metodología aplicada en las tres fases del estudio, se obtuvieron resultados que evidencian el impacto negativo de la transformación urbana en la Avenida 7 de Octubre y su efecto en la apropiación del espacio público.

### 4.1. Análisis de las dinámicas peatonales

El análisis de observación directa evidenció que las dinámicas peatonales en la Avenida 7 de Octubre están altamente condicionadas por la actividad comercial y la falta de espacios adecuados para la permanencia de los usuarios. En la Figura 8, se observa que las zonas con mayor flujo peatonal coinciden con la presencia de bancos, instituciones públicas y comercios de alto tránsito.



**Figura 8.** Resultados de la Ficha de Observación Tramo "A".

Las observaciones también indicaron que la mayor parte de la avenida no favorecen la permanencia, ya que el mobiliario urbano disponible es insuficiente o se encuentra en mal estado (ver Figura 7). Los usuarios tienden a utilizar únicamente aquellas áreas donde encuentran protección climática, lo que confirma la importancia de la infraestructura para la apropiación del espacio público.

#### 4.2. Evaluación de la habitabilidad del espacio público

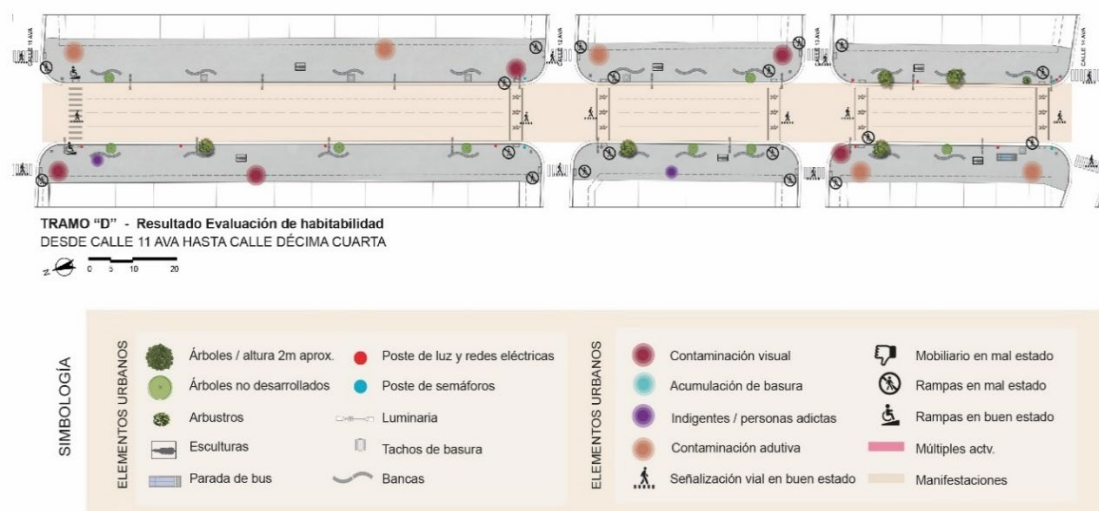
Se analizaron 32 indicadores de habitabilidad en los cuatro tramos de la avenida, evaluando aspectos como accesibilidad, confort ambiental, seguridad e infraestructura. Los resultados se presentan en la Tabla 1.

Los resultados comprueban una notable deficiencia en la habitabilidad del espacio público, destacándose especialmente la ausencia de zonas de sombra, la accesibilidad limitada y una percepción de inseguridad durante el horario nocturno. En la Figura 9 se presenta la evaluación correspondiente al Tramo D, donde se constata una baja interacción peatonal, atribuida a la escasez de infraestructura para el descanso y a la exposición directa a las condiciones climáticas adversas.

**Tabla 1.** Resumen de los indicadores de habitabilidad aplicados al espacio público de la Avenida 7 de octubre.

CATEGORÍA	INDICADOR	CUMPLE	CUMPLE PARCIAL MENTE	NO CUMPLE
<b>DINAMICAS AMMBIENTALES</b>	Elementos naturales		X	
	Cambios climáticos			X
	Clima de la ciudad		X	
	Esmog			X
	Publicidad visual exterior			X
	Publicidad auditiva exterior			X
	Libre de humo de fumadores			X
	Libre de malos olores			X
<b>MOVILIDAD Y ACCESIBILIDAD</b>	El estado de la mala vial	X		
	Accesibilidad a los espacios públicos desde los medios de transporte	X		
	Rampas			X
	Zonas peatonales que existen actualmente			X
<b>SERVICIOS</b>	Señalización			X
	Inclusividad	X		
	Múltiples actividades			X
	Estado de aseo en que se encuentra el EP	X		
<b>DINÁMICA CULTURAL</b>	Elementos culturales			X
	Actividades culturales gratuitas			X
	Identidad de los espacios públicos			X
<b>SEGURIDAD</b>	Presencia de policías o personal de seguridad			X
	Presencia de cámaras de seguridad			X
<b>DINÁMICAS SOCIALES</b>	Normas de tránsito			X
	Posibilidad de realizar manifestaciones religiosas políticas artísticas	X		
	Equitativo para todos los géneros			X

CATEGORÍA	INDICADOR	CUMPLE	CUMPLE PARCIALMENTE	NO CUMPLE
	Presencia de artistas			X
	Presencia de indigentes, personas con adicciones, etc			X
	Diversidad de lo que pueda observarse o experimentarse			X
	Grafitis o pinturas en los muros de la ciudad			X
	Contrato social			X
INFRAESTRUCTURA	Calidad de la iluminación nocturna		X	
	Mobiliario			X
	Mantenimiento del mobiliario urbano			X
<b>TOTAL</b>		<b>5</b>	<b>3</b>	<b>24</b>



**Figura 9.** Resultados de la Ficha de evaluación Tramo “D”.

### 4.3. Propuesta de Lineamiento Estratégicos

A partir de los hallazgos obtenidos, se diseñó una matriz de lineamientos estratégicos para mejorar la apropiación del espacio público en la avenida. En la Tabla 2 se presentan los principales lineamientos propuestos.

Para visualizar la aplicación de estas estrategias, se elaboró un modelo tridimensional (ver Figura 10) con las mejoras sugeridas, donde evidencia cómo una intervención urbana basada en criterios de habitabilidad, accesibilidad e inclusión social puede transformar positivamente la experiencia del espacio público.



**Tabla 2.** Lineamientos estratégicos de diseño para la Avenida 7 de Octubre.

<b>CATEGORÍA</b>	<b>LINEAMIENTOS ESTRATÉGICOS DE DISEÑO PROPUESTOS</b>
<b>DINÁMICAS AMBIENTALES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proveer de buena arborización para generar sombras y microclimas agradables</li> <li>• Proveer de cubiertas para generar sombras (cuando se carece de vegetación alta o esta está en crecimiento)</li> <li>• Crear barreras naturales antiruido</li> <li>• Crear barreras naturales para mejorar la calidad del aire (considerar especies arbóreas que presenten buena capacidad de absorción del CO2)</li> <li>• Optar por el uso de especies vegetales nativas</li> <li>• Uso de pavimento fonoabsorbente (reducción del ruido)</li> <li>• Optar por un buen diseño paisajístico</li> </ul>
<b>MOVILIDAD Y ACCESIBILIDAD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Promover el uso de la bicicleta (medio de transporte seguro, sustentable y económico. Acción con el apoyo de gobiernos locales)</li> <li>• Implementar ciclo vía</li> <li>• Ganar espacio peatonal (ampliar aceras)</li> <li>• Distinción en la materialidad (pavimentos con diferentes texturas para delimitar zonas)</li> <li>• Uso de bolardos y macetas con plantas para delimitar y proteger zonas peatonales</li> <li>• Uso de pavimentos podotáctil para facilitar el desplazamiento de personas con discapacidad visual</li> <li>• Uso de calles compartidas a un solo nivel con prioridad al peatón</li> <li>• Diseñar rampas con pendientes adecuadas y libres de obstrucciones</li> </ul>
<b>SERVICIOS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducir los espacios de estacionamientos para ganar espacio peatonal</li> <li>• Brindar espacios para estacionar bicicletas</li> <li>• Regular las plazas de estacionamiento (políticas públicas)</li> <li>• Control de los taxis, restricciones dónde pueden dejar o recoger pasajeros (políticas públicas)</li> </ul>
<b>DINÁMICA CULTURAL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementar focos de atracción o hitos (ej. Elementos culturales, fuentes, esculturas, pavimentos de colores, pinturas, entre otros)</li> <li>• Diseñar zonas flexibles que permitan presentaciones artísticas, ferias, entre otras</li> </ul>

CATEGORÍA	LINEAMIENTOS ESTRATÉGICOS DE DISEÑO PROPUESTOS
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impulsar actividades artísticas (con el apoyo de gobiernos locales)</li> </ul>
<b>SEGURIDAD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Promover la transparencia del espacio público para generar la visibilidad natural</li> <li>• Brindar la posibilidad de ver hacia y desde el interior de los edificios</li> <li>• Utilizar elementos de protección como barreras naturales o elementos constructivos</li> <li>• Brindar espacios para que la gente permanezca en el espacio público (+personas, +seguridad)</li> </ul>
<b>DINÁMICAS SOCIALES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brindar zonas peatonales con mobiliario urbano bajo sombra</li> <li>• Brindar espacios confortables para caminar, permanecer y sentarse</li> <li>• Equilibrar las zonas funcionales y las zonas de estancia</li> <li>• Generar actividades que promuevan la interacción humana (de la mano con las actividades culturales)</li> <li>• Promover la diversidad de usos en planta baja</li> <li>• Promover la participación de los usuarios en los procesos de diseño (con el apoyo de los gobiernos locales)</li> </ul>
<b>INFRAESTRUCTURA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementar buena iluminación</li> <li>• Diseñar espacios públicos a la altura de los ojos (dimensión humana – Jan Geh)</li> <li>• Proveer de mobiliario público ergonómico y novedoso (que atraiga a las personas)</li> </ul>



**Figura 10.** Lineamientos estratégicos de diseño aplicados sobre modelo 3D en la Avenida 7 de Octubre.

A diferencia de la intervención existente, misma que priorizó el aspecto físico sin considerar el uso cotidiano ni las condiciones climáticas locales, la propuesta que se visualiza plantea estrategias como arborización funcional, mobiliario ergonómico y recorridos peatonales accesibles. Esta propuesta pone en evidencia las limitaciones del proyecto original, misma que redujo la regeneración a una renovación superficial, y demuestra que una planificación sensible al contexto centrada en el usuario puede dar lugar a espacios públicos más habitables, apropiables y coherentes con las dinámicas urbanas.

## **5. DISCUSIÓN**

### **5.1. Limitaciones de la intervención y desconexión con la vida urbana**

Los resultados de este estudio muestran que la regeneración urbana de la Avenida 7 de Octubre no logró su objetivo de revitalizar el espacio público para que los usuarios se apropien y permanezcan en él. La intervención pasó por alto aspectos clave de la vida urbana diaria, como la protección ante factores climáticos adversos, el confort peatonal, la accesibilidad universal y la seguridad ciudadana.

Esta falta de atención a factores clave como el confort peatonal, la accesibilidad y la seguridad respalda lo que mencionan Perrone y Carrasco [14], quienes señalan que muchas transformaciones urbanas se han enfocado solo en el cambio morfológico, sin considerar el impacto que estas intervenciones generan en el habitar del espacio público.

### **5.2. Un espacio sin sentido de pertenencia**

En cuanto a la apropiación, el estudio reveló que los usuarios no se sienten conectados con el nuevo espacio, lo que ha llevado a un uso fragmentado y meramente funcional. Como explica Cala [15], la apropiación no solo refleja en la ocupación física, sino también en el vínculo emocional que se establece con el lugar y su integración en las rutinas diarias. Después de su regeneración, la Avenida 7 de Octubre dejó de ser un punto de encuentro y se transformó en un corredor de tránsito obligatorio, debilitando así su papel como escenario de interacción y construcción simbólica. Este hallazgo coincide con lo que observaron Cedillo *et al.* [3], quienes concluyen que muchas intervenciones en espacios públicos en Ecuador han resultado en una pérdida del sentido de pertenencia. Este fenómeno puede relacionarse con la pérdida de identidad social urbana, tal como lo definen Valera y Pol [16], quienes sostienen que el espacio público debe ser un escenario de referencia compartido, cargado de significado para sus habitantes.

### **5.3. Habitabilidad y desconexión técnica**

El análisis de los indicadores de habitabilidad urbana mostró que solo 5 de los 32 indicadores evaluados se cumplen de manera satisfactoria, 3 de ellos de manera parcial y 24 presentan deficiencias. Estas cifras reflejan una desconexión entre la planificación técnica del proyecto y las verdaderas necesidades de los peatones, Páramo y Burbano [2] argumentan que los espacios públicos deben ser diseñados desde la experiencia del usuario, donde la permanencia, la integración social y la diversidad de actividades sean posibles gracias a un diseño inclusivo, accesible y cómodo. La falta de sombra, la exposición al ruido, el deterioro del mobiliario y la inseguridad nocturna son factores que limitan esta experiencia en la avenida 7 de Octubre. Tal como señala Casal [17], el ambiente físico incide directamente en el bienestar de las personas, por lo que descuidar el confort ambiental repercute negativamente en la habitabilidad del espacio urbano.

### **5.4. Referentes exitosos y aprendizajes aplicables**

Comparando esta intervención con casos exitosos en la región, como el Paseo Carabobo en Medellín, se puede ver que el éxito de esas intervenciones se debió a que priorizaron al peatón y crearon condiciones ambientales y sociales favorables para el encuentro [18]. En contraste, en

Quevedo, la regeneración se centró en cambiar el pavimento y mobiliario sin una visión integral de lo urbano, lo que coincide con la crítica de Eljuri [19], quien señala que muchas intervenciones en el espacio público patrimonial de Cuenca han fracasado por priorizar la materialidad y descuidar los usos sociales y culturales del lugar.

### **5.5. Falta de accesibilidad e inequidad urbana**

Una de las debilidades que se identificó en este estudio está relacionada con la accesibilidad universal. Durante la observación en campo, se notaron rampas mal diseñadas, aceras discontinuas y cruces peatonales inseguros. Esto no solo deja fuera a las personas con discapacidad, sino que también va en contra de los principios de equidad urbana. Como mencionan Gehl y Svarre [20], la calidad del espacio público se evalúa también por su capacidad de incluir a todos los ciudadanos, sin importar su edad, condición física o situación socioeconómica.

### **5.6. Limitaciones metodológicas y futuras perspectivas**

Desde un enfoque metodológico, aunque el estudio utilizó herramientas válidas como la observación directa y encuestas estructuradas, una de las limitaciones fue el tiempo limitado para la recolección de datos en el campo, lo que impidió capturar información en diferentes épocas del año o en días no laborables. Además, aunque se trabajó con una muestra estadísticamente significativa de usuarios, la naturaleza subjetiva de algunas respuestas podría haber influido en ciertos resultados. Para abordar estas limitaciones, se sugiere que futuras investigaciones implementen una metodología longitudinal que permita observar cómo evolucionan los patrones de uso a lo largo del año y realicen estudios comparativos con otros ejes urbanos regenerados en la ciudad.

### **5.7. Recomendaciones para una intervención más sensible y participativa**

A partir de estos hallazgos, es crucial replantear el modelo de intervención urbana en la Avenida 7 de Octubre. A continuación, se presentan algunas recomendaciones:

- Implementar estrategias que ofrezcan sombra y confort climático, como una adecuada arborización y la instalación de cubiertas ligeras en áreas de descanso considerando criterios técnicos para el confort térmico urbano [21].
- Mejorar la iluminación nocturna y aumentar la seguridad con vigilancia visible y cámaras en puntos estratégicos.
- Incorporar señalética inclusiva, pavimento podotáctil y rampas accesibles para asegurar una movilidad segura e inclusiva.
- Estimular la vida urbana a través de ferias, expresiones artísticas, zonas multiusos y actividades culturales temporales.
- Fomentar procesos participativos con la ciudadanía, integrando sus memorias, costumbres y expectativas en cualquier rediseño futuro.

En resumen, esta investigación respalda la idea de que los proyectos de regeneración urbana sin un enfoque humanista y de participación ciudadana, puede desarticular los espacios públicos de su contexto social y cultural. El caso de la Avenida 7 de Octubre es un llamado a repensar las políticas de intervención urbana en ciudades intermedias de Ecuador, adoptando enfoques integrales que devuelven el protagonismo al peatón y promuevan la apropiación activa del espacio público como un escenario vital de lo urbano.



## 6. CONCLUSIONES

La regeneración urbana en la Avenida 7 de Octubre ha tenido un impacto negativo en la apropiación del espacio público, generando problemas de accesibilidad, confort y seguridad. Los hallazgos del estudio permiten concluir lo siguiente:

- **Déficit en la habitabilidad urbana:** la avenida presenta carencias en términos de confort, accesibilidad e infraestructura. La falta de mobiliario adecuado, iluminación deficiente y la ausencia de elementos que brinden protección climática afectan la permanencia y uso del espacio público.
- **Condiciones climáticas adversas:** la falta de vegetación y sombra ha reducido la permanencia de los usuarios.
- **Limitaciones en movilidad y accesibilidad:** la regeneración urbana no contempló adecuaciones para peatones con discapacidad ni una planificación eficiente de cruces seguros, generando dificultades en la movilidad peatonal y afectando la seguridad de los transeúntes.
- **Seguridad y percepción negativa:** la baja iluminación nocturna y la escasa vigilancia han generado una percepción de inseguridad en la avenida.
- **Necesidad de rediseño:** la intervención realizada no consideró las dinámicas sociales preexistentes, generando espacios sin identidad y con escasa funcionalidad. Para que la regeneración urbana sea efectiva, es necesario diseñar espacios con un enfoque centrado en el usuario, considerando aspectos ambientales, sociales y funcionales.

Los resultados obtenidos recalcan la necesidad de repensar las intervenciones urbanas desde un enfoque integral centrado en las necesidades reales de los ciudadanos. Asimismo, invitan incorporar estrategias clave para construir ciudades más humanas y sostenibles, donde el papel del espacio público se consolide como un verdadero escenario de encuentro, diversidad y pertenencia.

## REFERENCIAS

- [1] J. Borja, y Z. Muxi, *El espacio público, ciudad y ciudadanía*, Barcelona: Electa, 2003. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Zaida-Martinez/publication/31731154\\_El\\_espacio\\_publico\\_ciudad\\_y\\_ciudadania\\_J\\_Borja\\_Z\\_Muxi\\_prol\\_de\\_O\\_Bohigas/links/543fbcd00cf2be1758cf9779/El-espacio-publico-ciudad-y](https://www.researchgate.net/profile/Zaida-Martinez/publication/31731154_El_espacio_publico_ciudad_y_ciudadania_J_Borja_Z_Muxi_prol_de_O_Bohigas/links/543fbcd00cf2be1758cf9779/El-espacio-publico-ciudad-y)
- [2] P. Páramo, y A. Burbano, “La habitabilidad del espacio urbano”, en *Psicología Ambiental*, vol. 1, W. Sierra-Barón, K. L. Millán-Otero y Ó. Navarro Carrascal. Bogotá, ASCOFAPSI, 2022, pp. 104-129. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Willian-Sierra-Baron-Phd-2/publication/360055528\\_Psicologia\\_Ambiental\\_Volumen\\_I\\_Experiencias\\_dialogos\\_y\\_perspectivas\\_academicas/links/625f37d29be52845a911ba97/Psicologia-Ambiental-Volumen-I-Experiencias-dialogos-y-pers](https://www.researchgate.net/profile/Willian-Sierra-Baron-Phd-2/publication/360055528_Psicologia_Ambiental_Volumen_I_Experiencias_dialogos_y_perspectivas_academicas/links/625f37d29be52845a911ba97/Psicologia-Ambiental-Volumen-I-Experiencias-dialogos-y-pers)
- [3] Á. V. Cedillo-Mendoza, M. C. Izquierdo-Espinoza, V. Jiménez-Nicolalde, y N. E. Cabrera-Jara, “REGENERACIÓN URBANA, SENTIDO DE PERTENENCIA Y APROPIACIÓN EN ÁREAS PATRIMONIALES: Estudio de cuatro espacios públicos del Centro Histórico de Cuenca,” *DISEÑO ARTE Y ARQUITECTURA*, no. 11, pp. 81-106, Dec. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.33324/daya.vi11.460>

- [4] Contraloría General del Estado del Ecuador, “*Examen Especial a la administración de talento humano; determinación, recaudación, depósito y registro de los ingresos de autogestión de mercados, bahías y parque; y análisis de los procesos precontractual, contractual, ejecución, recepción, liquidación y,*” 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.contraloria.gob.ec/WFDescarga.aspx?id=70349&tipo=inf>
- [5] T. Vidal Moranta, y E. Pol Urrútia, “La apropiación del espacio: una propuesta teórica para comprender la vinculación entre las personas y los lugares,” *Anuario de Psicología*, vol. 36, no. 3, pp. 281-297, 2005. [En línea]. Disponible en: <https://raco.cat/index.php/AnuarioPsicologia/article/view/61819>
- [6] P. Páramo, A. Burbano, B. Jiménez-Domínguez, V. Barrios, C. Parquali, F. Vivas, O. Moros, M. Alzate, J. C. Jaramillo Fayad, y E. Moyano, “La habitabilidad del espacio público en las ciudades de América Latina,” *Avances en psicología latinoamericana*, vol. 36, no. 2, pp. 345-362, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.urosario.edu.co/xml/799/79955443009/index.html>
- [7] P. Páramo, A. Burbano, y D. Fernandez-Londoño, “Estructura de indicadores de habitabilidad del espacio público en ciudades latinoamericanas,” *Revista de Arquitectura*, vol. 18, no. 2, pp. 6-26, Nov. 2016. [En línea]. Disponible en: <https://revistadearquitectura.ucatolica.edu.co/article/view/391>
- [8] D. F. Muñoz Duque, y L. Zapata-González, “El espacio público en torno a las dinámicas urbanas,” en *Miradas al espacio Público*, L. Zapata-González y E. Zuleta-Gonzalez, Ed. Bogotá, Editorial Universitaria, 2018, pp. 79-81. [En línea]. Disponible en: <https://www.ugc.edu.co/sede/armenia/images/investigaciones/documentos/Integrador-arquitectura-vf.pdf>
- [9] C. Paquette Vassalli, “Regeneración urbana: un panorama latinoamericano,” *Revista INVI*, vol. 35, no. 100, pp. 38-61, Nov. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/view/63370>
- [10] J. M. Fonseca-Rodríguez, “La importancia y la apropiación de los espacios públicos en las ciudades,” *Paakat: Revista de Tecnología y Sociedad*, vol. 7, Sep. 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=499051556003>
- [11] F. Tassara Cánepa, “La nueva realidad de la avenida Larco: ¿Cómo la pandemia ha impactado en los negocios?,” *El Comercio Perú*, 2020. [En línea]. Disponible: <https://elcomercio.pe/economia/peru/coronavirus-la-nueva-realidad-de-la-avenida-larco-como-la-pandemia-ha-impactado-en-los-negocios-de-la-zona-miraflores-comercio-turismo-agencia-de-viajes-libreria-restaurant-noticia/>
- [12] A. Echeverri, “Alejandro Echeverri + Valencia Arquitectos,” [En línea]. Disponible: <https://camilo-toro.squarespace.com/new-gallery-3/d46lg05fjdeoxx2w0g7y6e7pciibe3>. Accedido: 08 Febrero 2023.
- [13] M. Melo, “Prefeitura de Fortaleza,” Avenida Monsenhor Tabosa recebe Corredor Turístico Cultural neste sábado, 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.fortaleza.ce.gov.br/noticias/avenida-monsenhor-tabosa-recebe-corredor-turistico-cultural-neste-sabado>
- [14] M. G. Navas Perrone, y M. E. Torres Carrasco, “Patrimonialización y apropiación de las calles en el centro histórico de Cuenca,” *Revista de Área de estudios Urbanos*, pp. 166-189, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://publicaciones.sociales.uba.ar/index.php/quid16/article/view/6428/0>

- [15] C. A. Cala Carrascal , “Dinámicas de apropiación del espacio público y sentido de pertenencia en la ciudad de Valledupar. Casos de estudio: Plaza Alfonso López y Parque La Provincia”. Tesis de Maestría, Universidad del Norte, 2022. [En línea]. Disponible:  
<https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/10257/000216149.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [16] S. Valera Pertegás, y E. Pol Urrutia , “El concepto de identidad social urbana: Una aproximación entre la psicología social y la psicología ambiental,” *Anuario de psicología*, no. 62, pp. 5-24, 1994. [En línea]. Disponible:  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2946898>
- [17] J. M. Casal, “La arquitectura del Bienestar: el ambiente físico,” *Informes de la Construcción*, vol. 31, no. 300, p. 49-53, May. 1978. [En línea]. Disponible en:  
<https://doi.org/10.3989/ic.1978.v31.i300.2580>
- [18] C. Franco Giraldo, “El concepto de la ciudadanía en el espacio público: estudio de caso paseo peatonal Carabobo - Medellín”. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2008. [En línea]. Disponible:  
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2438>
- [19] G. Eljuri, “LA RECUPERACIÓN DEL ESPACIO PÚBLICO Y EL OLVIDO DE LO URBANO,” *Diseño Arte y Arquitectura DAYA*, no. 11, pp. 107-126, Dic. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.33324/daya.vi11.461>
- [20] J. Gehl y B. Svarre, *How to study public life*, Washington DC: Prensa de la isla Washington, DC, 2013.
- [21] E. Mínguez Martínez, P. Martí Ciriquián, M. Vera Moure, y D. Meseguer García, “Claves para Proyectar espacios públicos confortables. Indicador del Confort en el espacio Público”, *Enrique Mínguez Arquitectos*, no. 165, pp. 66-76, 2013. [En línea]. Disponible en: [https://eminguez.com/wp-content/uploads/2013/06/Claves-E.P.-Confortables\\_WEB.pdf](https://eminguez.com/wp-content/uploads/2013/06/Claves-E.P.-Confortables_WEB.pdf)

Copyright (2026) © Kelly Macías Chan, Cristina Suárez Looor y Eddyn Macías Chan.

Este texto está protegido bajo una licencia internacional [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/). Usted es libre para compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato. También podrá adaptar: remezclar, transformar y construir sobre el material. [Ver resumen de la licencia.](#)



# Revisión de la literatura para el conteo de unidades formadoras de colonias en microorganismos mediante visión artificial

## *(Literature Review for Counting Colony-Forming Units in Microorganisms Using Artificial Vision)*

Luis Alberto Jiménez Villa, María Salomé Alejandre Apolinar, Virginia Lagunes Barradas, Miguel Ángel Hidalgo Reyes  
TecNM/Instituto Tecnológico Superior de Xalapa, Xalapa, México  
[247000901@itsx.edu.mx](mailto:247000901@itsx.edu.mx), [salome.aa@xalapa.tecnm.mx](mailto:salome.aa@xalapa.tecnm.mx), [virginia.lb@xalapa.tecnm.mx](mailto:virginia.lb@xalapa.tecnm.mx),  
[miguel.hr@xalapa.tecnm.mx](mailto:miguel.hr@xalapa.tecnm.mx)

**Resumen:** En este estudio se llevó a cabo una Revisión Sistemática de la Literatura con el objetivo de identificar los procedimientos más eficientes para el tratamiento de imágenes utilizadas en los análisis microbiológicos. Esta búsqueda incluye publicaciones que se encuentran entre 2019 y 2025, haciendo uso de las principales bases de datos científicas indexadas como Scielo, ACM, Redalyc, Consensus, IEEE Xplore y Springer, así como el buscador Google Académico. Durante la búsqueda se analizaron 41 artículos donde se identificaron diversos enfoques de procesamiento tradicional de imágenes, aprendizaje automático y técnicas híbridas. Los resultados permitieron identificar métodos y herramientas, proporcionando una base sólida para su incorporación en un sistema computacional. La contribución principal es establecer fundamentos para el desarrollo de una solución tecnológica automatizada que facilite la implementación de conteos automáticos para hacer más eficiente el trabajo de los laboratorios científicos y clínicos a través de la disminución de tiempo y errores humanos.

**Palabras clave:** Tecnología aplicada, inteligencia artificial, procesamiento de imágenes, cultivos bacterianos, automatización.

**Abstract:** This study conducted a Systematic Literature Review with the aim of identifying the most efficient procedures for processing images used in microbiological analyses. This search includes publications from 2019 to 2025, using the main indexed scientific databases such as Scielo, ACM, Redalyc, Consensus, IEEE Xplore, and Springer, as well as the Google Scholar search engine. During the search, 41 articles were analyzed, identifying various approaches to traditional image processing, machine learning, and hybrid techniques. The results allowed us to identify methods and tools, providing a solid basis for their incorporation into a computer system. The main contribution is to establish the foundations for the development of an automated technological solution that facilitates the implementation of automatic counting to streamline the work of scientific and clinical laboratories by reducing time and human error.

**Keywords:** Applied technology, artificial intelligence, image processing, bacterial cultures, automation.

## 1. INTRODUCCIÓN

El análisis microbiológico es considerado una herramienta clave en múltiples áreas, principalmente científicas, clínicas, agropecuarias, veterinarias e industriales, en particular en la



agroindustria y el procesamiento de alimentos y bebidas. Su importancia radica en permitir la identificación, cuantificación y categorización de los microorganismos presentes en las muestras biológicas. Dentro de estos procedimientos, uno de los más comunes utilizados para el análisis es el conteo de unidades formadoras de colonias (UFC), empleado para estimar la cantidad de microorganismos viables mediante la formación de colonias en un medio de cultivo específico [1], [2].

Este método consiste en realizar diluciones seriadas de una muestra, para posteriormente sembrar un volumen determinado en placas con un medio de cultivo, incubarlas, y realizar el conteo de las colonias que se formaron de manera visible [3]. El intervalo óptimo para este conteo es de 30 a 300 colonias por placa, ya que con este rango se garantiza la exactitud en el número de microorganismos por unidad de volumen o peso de la muestra examinada [4].

Este procedimiento presenta limitaciones importantes; entre ellas, es la alta carga de trabajo para el personal que realiza el conteo. Además, la extensa cantidad de tiempo dedicado para obtener resultados precisos y, principalmente, la posibilidad de presentar errores derivados de la interpretación del operador debido a la fatiga visual, lo que aumenta las limitaciones antes señaladas [5]. Otros factores incluyen la variabilidad de las condiciones de incubación de la muestra y la dificultad para distinguir colonias pequeñas o agrupadas los cuales pueden afectar la precisión y reproducibilidad de los resultados [6].

Sin embargo, con el avance de las tecnologías de la información, en especial áreas como la visión artificial, el procesamiento de imágenes y el aprendizaje automático han comenzado a ser exploradas para la implementación de soluciones para automatizar este tipo de tareas [7]. Gracias a estas herramientas es posible realizar análisis a imágenes digitales con alta precisión. A pesar de estos avances, existe aún una brecha en el desarrollo e implementación de soluciones automatizadas específicamente orientadas al análisis microbiológico en contextos accesibles y de bajo costo, como pequeños laboratorios o centros de salud con recursos limitados [8].

Bajo este contexto, se desarrolló una Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) con el principal objetivo de identificar las técnicas y procedimientos más eficaces para llevar a cabo el procesamiento de imágenes aplicados en el análisis microbiológico principalmente el conteo de las unidades formadoras de colonias. Se realizó esta revisión con los estudios publicados entre los años 2019 y 2025, considerando las principales fuentes de información científica: Google Académico, Scielo, ACM, Redalyc, Consensus, IEEE Xplore y Springer. Con esta RSL se busca establecer una base teórica sólida que sirva como sustento para el desarrollo e implementación de una aplicación móvil capaz de realizar el conteo automático de UFC.

El aporte principal de este trabajo es conocer y definir las bases para el desarrollo de una herramienta digital automatizada, accesible y eficiente, que permita optimizar un proceso microbiológico en entornos científicos y clínicos, disminuyendo los tiempos de análisis y los márgenes de error humano [9].

## **2. METODOLOGÍA**

Este análisis se realizó utilizando la metodología sugerida por Barbara Kitchenham y Stuart M. Charters [10] para la creación de RSL en el campo de la ingeniería del software. Esta metodología se adaptó al contexto de las técnicas empleadas para el procesamiento de imágenes aplicadas al análisis microbiológico. Esto se debe a que esta metodología ofrece un enfoque estricto para la identificación, elección, valoración y síntesis de investigaciones pertinentes con el objetivo de asegurar la relevancia de los resultados obtenidos.

La metodología empleada en este estudio se dividió en tres fases principales. En la primera fase, se realizó la planificación de la revisión, en la cual se formularon las preguntas de investigación, se definieron las temáticas secundarias y se seleccionaron las principales bases de

datos científicas que se utilizarían para la búsqueda y recopilación de la información. En la segunda fase, se identificaron los estudios relevantes gracias a los criterios de inclusión y exclusión, con el fin de seleccionar aquellos artículos científicos pertinentes al objeto de estudio. Por último, la tercera fase consistió en el análisis y descripción de los estudios seleccionados, se recopilaron los datos clave vinculados con las preguntas de investigación definidas previamente. Gracias a estas etapas se estructuró el proceso de revisión de forma rigurosa y replicable. La Figura 1 ilustra gráficamente las fases metodológicas desarrolladas en esta investigación.



**Figura 1.** Fases de la metodología planteada.

### **Fase 1: Planificación de la revisión**

#### **Preguntas de investigación**

En esta primera etapa se definieron los principales elementos para la revisión sistemática de la literatura. Para ello, se formularon las preguntas de investigación con el fin de delimitar el alcance de la investigación y realizar la búsqueda de técnicas específicas de procesamiento de imágenes aplicadas al análisis microbiológico. Además, se establecieron las temáticas secundarias relacionadas a la investigación como lo son el aprendizaje automático, el conteo automatizado de colonias, el análisis microbiológico y la visión artificial.

Basándose en lo anterior, se formularon las siguientes cuestiones de investigación:

- ¿Qué métodos de tratamiento de imágenes se han empleado para el análisis microbiológico?
- ¿Qué técnicas fundamentadas en la inteligencia artificial y el aprendizaje automático han probado una mayor exactitud en la identificación de colonias microbianas (UFC)?
- ¿Qué recursos, algoritmos o herramientas tecnológicas se utilizan frecuentemente en los estudios para el análisis automático de imágenes?
- ¿Cuáles son los parámetros de una imagen que pueden influir en la precisión del análisis automatizado de colonias microbianas?

#### **Identificación de bases de datos**

Se reconocieron y escogieron buscadores y bases de datos científicas relevantes empleadas en el área de investigación, dando prioridad aquellas que poseen un reconocimiento extenso y publicaciones indexadas. En la Tabla 1 se presentan las fuentes de información escogidas junto con su criterio de elección, donde se incluyeron: Google Académico, Scielo, Biblioteca Digital ACM, Redalyc, Consensus, IEEE Xplore y SpringerLink. Se estableció la búsqueda con el fin de asegurar la calidad de los estudios para las etapas siguientes de la investigación.

**Tabla 1.** Fuentes de información utilizadas en la búsqueda.

<b>Fuente de información</b>	<b>Criterio de elección</b>
Google Académico	Motor de búsqueda complementario.
Scielo	Revistas científicas de acceso abierto en América Latina.
Biblioteca Digital ACM	Publicaciones científicas de la <i>Association for Computing Machinery</i> .
Redalyc	Red de revistas científicas de América Latina.
Consensus	Motor de búsqueda que implementa IA.
IEEE Xplore	Alto impacto en el campo de la ingeniería.
Springer Link	Cobertura multidisciplinaria en ingeniería y científicas.

Se formularon varias cadenas de búsqueda y se evaluó su precisión en función de los objetivos del estudio, priorizando aquellos resultados más pertinentes. Los términos predominantes utilizados en la búsqueda bibliográfica corresponden a las siguientes cadenas presentadas en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Cadenas de búsqueda empleadas en las diversas fuentes de información.

<b>Fuente de información</b>	<b>Cadena de búsqueda</b>	<b>Artículos encontrados</b>
Google Académico	("colony-forming unit" OR microbiology) AND ("artificial intelligence" OR "computer vision") AND (count or precision) AND "image processing"	5.700
Scielo	("colony-forming unit" OR microbiology) AND (count OR precision) AND "artificial intelligence" AND image	4
ACM	("colony-forming unit" OR microbiology) AND ("artificial intelligence" OR "computer vision") AND (count or precision) AND "image processing"	690
Redalyc	("colony-forming unit" OR microbiology) AND ("artificial intelligence" OR "computer vision") AND (count or precision) AND "image processing"	12
Consensus	"colony-forming unit" AND microbiology AND ("artificial intelligence" OR "computer vision") AND ("count" or "precision") AND "image processing"	130
IEEE Xplore	("colony-forming unit" OR microbiology) AND ("artificial intelligence" OR "computer vision") AND (count OR precision) AND "image processing"	90
Springer Link	("colony-forming unit" OR microbiology) AND ("artificial intelligence" OR "computer vision") AND (count or precision) AND "image processing"	310
<b>Total</b>		<b>6.936</b>

## Fase 2: Revisión de estudios relevantes

Los criterios de inclusión fueron los siguientes:

- Solo publicaciones en el idioma español o inglés.
- Publicaciones en el periodo entre 2019 y 2025.
- Documentos completos, incluyendo artículos de revistas, libros y tesis.
- Trabajos relacionados con microbiología, análisis de imágenes, visión artificial y aprendizaje automático.

Los criterios de exclusión fueron los siguientes:

- Primera clasificación: Se excluyeron las publicaciones fuera del periodo establecido o idiomas distintos.
- Segunda clasificación: Se excluyeron aquellas publicaciones que no estuvieran encaminados a las ciencias de la computación, que no pertenecían al tema de investigación y la disponibilidad del documento original.
- Tercera clasificación: Se excluyeron aquellos que tras una revisión preliminar no presentaba una relevancia significativa a la investigación.

Una vez definidos los criterios de inclusión y exclusión, se realizó el análisis de la literatura en donde se examinó cada fuente de información seleccionada con el fin de identificar los principales hallazgos, los resultados y conclusiones relevantes para este estudio.

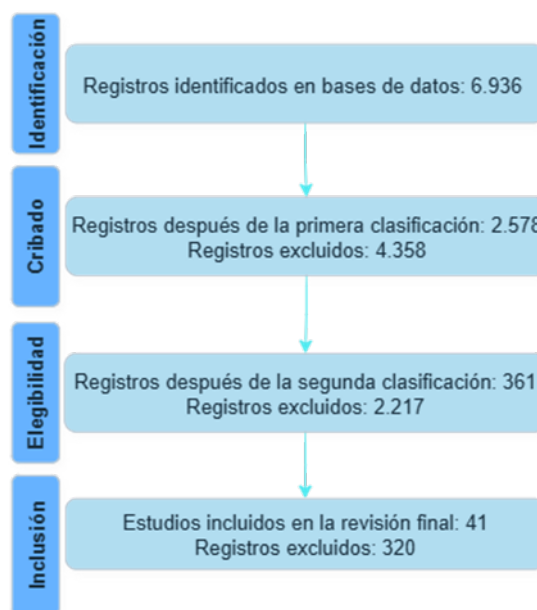
## 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Como resultado de esta rigurosa revisión, se seleccionaron un total de 41 artículos aplicando los criterios de exclusión previamente establecidos. La cantidad de artículos encontrados en la búsqueda bibliográfica por cada criterio es presentada en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Clasificaciones en la revisión de la literatura.

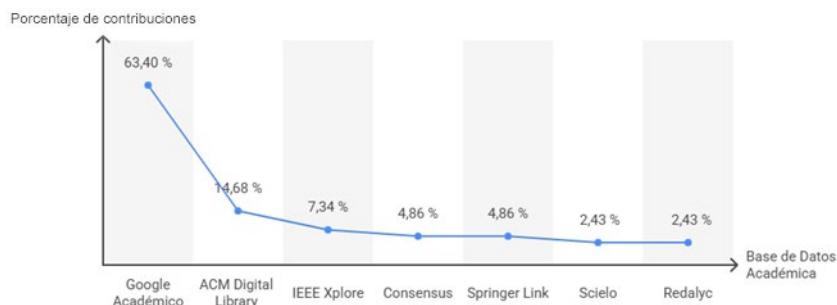
<b>Fuente de información</b>	<b>Búsqueda inicial</b>	<b>Primera clasificación</b>	<b>Segunda clasificación</b>	<b>Tercera clasificación</b>
Google Académico	5.610	2.151	213	26
Scielo	4	2	1	1
ACM	690	215	94	6
Redalyc	12	6	2	1
Consensus	130	75	10	2
IEEE Xplore	90	26	9	3
Springer Link	310	103	32	2
<b>Total</b>	<b>6.936</b>	<b>2.578</b>	<b>361</b>	<b>41</b>

En la Figura 2 se ilustra de manera gráfica el proceso de búsqueda y selección de la literatura siguiendo la metodología PRISMA. Se muestra el número de registros identificados, los criterios de exclusión aplicados en cada etapa (cribado, elegibilidad) y los estudios finalmente incluidos en la revisión. La calidad metodológica de los estudios seleccionados se evaluó considerando criterios como la claridad de los objetivos, la relevancia de los resultados y la actualidad de la información.



**Figura 2.** Diagrama de flujo PRISMA del proceso de selección de estudios.

En la Figura 3 se presenta la distribución porcentual de las propuestas científicas seleccionadas según su procedencia de las distintas fuentes de información consultadas en esta investigación. Los resultados indican que Google Académico aportó el mayor número de estudios, representando el 63,40 % del total. Le siguen ACM Digital Library con un 14,68% e IEEE Xplore con un 7,34%, Consensus con un 4,86% de igual manera Springer Link con 4,86%, mientras que Scielo represento el 2,43% y Redalyc con 2,43%.



**Figura 3.** Efecto porcentual de las publicaciones científicas.

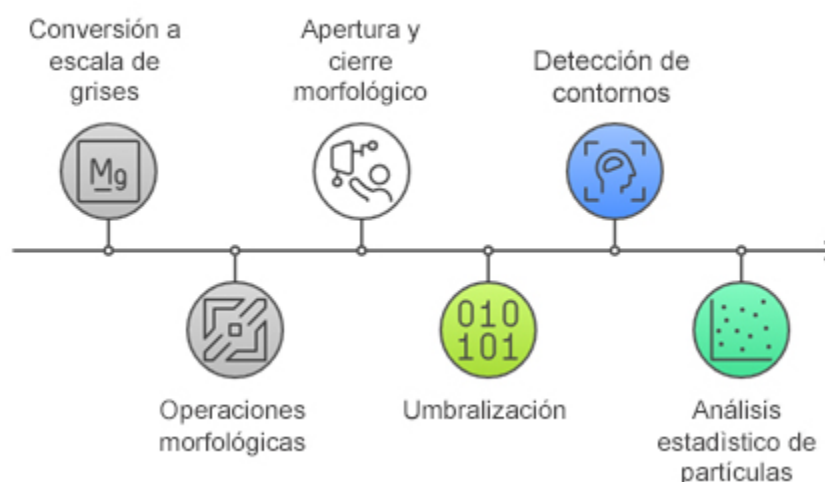
### Fase 3: Síntesis y análisis de estudios relevantes

En esta fase se llevó a cabo la valoración de la calidad de los estudios seleccionados y se obtuvo la información requerida para dar respuesta a las preguntas definidas en la fase uno. Las técnicas empleadas en esta investigación comenzaron desde revisión bibliográfica hasta aplicaciones prácticas y el resultado obtenido. Esta variedad de métodos posibilitó un análisis detallado de las características técnicas detectadas, además de valorar el efecto y la utilidad de las diferentes soluciones sugeridas en el marco del procesamiento de imágenes utilizado en el análisis microbiológico.

Los procedimientos utilizados en el análisis microbiológico incluyeron tanto técnicas convencionales de procesamiento digital como métodos fundamentados en inteligencia artificial. Estas técnicas facilitan la mejora de la calidad de las imágenes tomadas, la segmentación exacta de los microorganismos existentes y la realización de un conteo automatizado de unidades formadoras de colonias (UFC) [11].

La Figura 4 muestra un esquema general del proceso más utilizado para llevar a cabo el análisis de una imagen, en el que se señalan las etapas principales que intervienen. A continuación, se detallan la serie de técnicas convencionales que son más habituales:

1. Conversión a escala de grises: Se transforma la imagen original a una escala de grises con el fin de trabajar con un solo canal de intensidad [12].
2. Operaciones morfológicas: Se resalta las estructuras oscuras y se calcula la diferencia entre el cierre morfológico y la imagen original [13].
3. Apertura y cierre morfológico: Se elimina el ruido y objetos presentes en la imagen que no son requeridos, asimismo se conectan las regiones fragmentadas [13].
4. Umbralización: Se aplica un umbral de intensidad para segmentar, convirtiendo la imagen en una versión binaria con el fin de facilitar la identificación de objetos [14].
5. Detección de contornos: Se identifican los bordes incluso cuando estas se encuentran agrupadas o parcialmente superpuestas [12].
6. Análisis estadístico de partículas: Se realiza un filtrado de los objetos detectados según criterios como área, forma o circularidad, eliminando artefactos y manteniendo únicamente estructuras compatibles [15].



**Figura 4.** Proceso de análisis para una imagen.

Asimismo, en otros estudios, se muestra el empleo de técnicas basadas en inteligencia artificial para llevar a cabo el estudio microbiológico, las cuales han probado ser eficientes en labores de clasificación, identificación y segmentación de microorganismos. Entre los más comunes se incluyen:

- Redes Convolucionales Neuronales (CNN): Estas redes son capacitadas con imágenes clasificadas para adquirir conocimientos sobre patrones morfológicos propios de las colonias de microorganismos [15].
- Segmentación semántica: Emplean modelos de aprendizaje automático para distinguir con exactitud colonias que se superponen, incrementando la exactitud del análisis en imágenes complejas [16].
- Modelos para identificar objetos: Facilitan la identificación de microorganismos individuales en imágenes de microscopía, incluso en concentraciones bajas, lo que favorece una identificación más precisa [19].

En la Tabla 4 se sintetizan las propiedades de las principales técnicas de inteligencia artificial utilizadas en los artículos analizados, donde se resaltan las características específicas: la arquitectura, el nivel de profundidad en su procesamiento y su utilidad.



**Tabla 4.** Principales técnicas de inteligencia artificial.

Técnica de IA	Características
Aprendizaje automático (ML)	Implementa algoritmos supervisados como SVM, k-NN, árboles de decisión y no supervisados (clustering), además de requerir datos estructurados y características definidas de manera manual.
CNN	Implementa arquitectura de aprendizaje automático especializada en procesamiento de imágenes, aprende características directamente desde los datos sin necesidad de extracción manual.
Aprendizaje profundo	Implementa arquitecturas profundas como CNN, RNN, GAN, además de ser capaz de procesar datos no estructurados como imágenes, audio o texto.

En la Tabla 5 se presenta el análisis comparativo entre las ventajas y limitaciones de las técnicas de inteligencia artificial mencionadas con anterioridad. Esta información permite identificar los contextos en los que cada técnica resulta más eficiente, considerando factores como precisión, recursos computacionales, flexibilidad de aplicación y complejidad de implementación.

**Tabla 5.** Principales técnicas de inteligencia artificial aplicas.

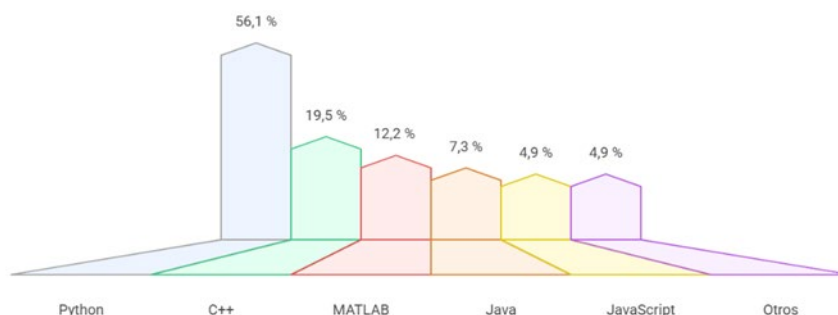
Técnica de IA	Ventajas	Limitaciones
Aprendizaje automático (ML)	Menor necesidad de datos para el entrenamiento y un bajo requerimiento computacional.	Precisión limitada en problemas complejos además complejidad de adaptar a datos no estructurados.
CNN	Alta precisión en clasificación, segmentación de imágenes y permite la escalabilidad en grandes conjuntos de datos.	Requiere grandes cantidades de datos etiquetados y un entrenamiento costoso en tiempo y recursos.
Aprendizaje profundo	Mayor autonomía, capacidad de aprendizaje y puede detectar patrones complejos sin intervención humana.	Requiere hardware de alto rendimiento y un proceso de entrenamiento complejo.

Para una aplicación efectiva de las técnicas previamente descritas, la revisión sistemática recomienda el uso de lenguajes de programación que se distinguen por su robustez, adaptabilidad y amplia documentación, lo cual facilita la implementación de bibliotecas especializadas en procesamiento de imágenes y aprendizaje automático. En este sentido, los lenguajes más frecuentemente empleados en las investigaciones analizadas son:

- Python: Es el lenguaje más usado debido a su versatilidad y la disponibilidad de librerías especializadas para procesamiento digital de imágenes, como lo son OpenCV y PIL (Python Imaging Library) [18].
- Java: Es utilizado especialmente en plataformas como ImageJ, un software libre ampliamente usado en el análisis de imágenes biomédicas [20].

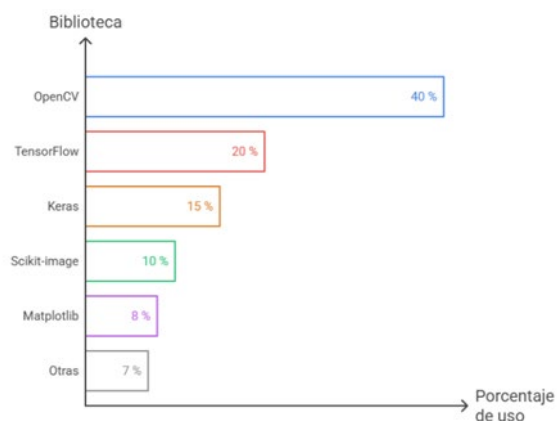
- R: Es usado para el análisis estadístico cuando se requiere procesamiento de imágenes en estudios bioestadísticos [21].
- MATLAB: Utilizado especialmente en entornos académicos para procesamiento de imágenes con sus potentes toolboxes. [22].
- C++: Se ha utilizado para el alto rendimiento en tareas de procesamiento en tiempo real, siendo compatible con bibliotecas como OpenCV [17].

En concordancia con lo expuesto, la Figura 5 presenta un análisis porcentual sobre la utilización de diversos lenguajes de programación en el ámbito del procesamiento de imágenes, resaltando aquellos que registran una mayor frecuencia de uso en estudios que incorporan métodos de inteligencia artificial. Python destaca por ser el más utilizado, con un uso del 56,1 %, debido a su extenso catálogo de bibliotecas especializadas y también por su sencillez de integración, C++ con 19,5 % debido a su desempeño en aplicaciones de procesamiento en tiempo real, MATLAB con 12,2 %, continúa siendo utilizada en entornos académicos debido a sus instrumentos de análisis y visualización, Java con 7,3 % y otros como lo son JavaScript y R tienen un porcentaje inferior de 4,9 %.



**Figura 5.** Principales lenguajes de programación utilizados.

La Figura 6 muestra el porcentaje de uso de bibliotecas más utilizadas en el análisis automático de imágenes a través de métodos de inteligencia artificial. Es notable que OpenCV es la biblioteca de mayor uso, con un 40 %, gracias a su eficacia en labores de preprocesamiento, identificación de límites y segmentación. TensorFlow (20 %) y Keras (15 %), que se emplean mayormente en la aplicación de modelos de aprendizaje profundo, como las redes neuronales convolucionales. En cuanto al uso de Scikit-image (10 %) para labores más concretas de análisis morfológico, Matplotlib (8 %) se utiliza frecuentemente como herramienta de visualización, el 7 % corresponde al grupo denominado "otras" bibliotecas, que incluye utilidades menos comunes pero complementarias.



**Figura 6.** Bibliotecas más utilizadas en proyectos de visión por computadora.

Se destaca la consolidación de OpenCV (Open Source Computer Vision Library). Esta es una biblioteca open source que proporciona una gran cantidad de funciones para poder llevar a cabo el procesamiento digital y la visión computacional que se requiere, permitiendo el filtrado, segmentación, detección de contornos y operaciones morfológicas, siendo estos elementos fundamentales en el recuento y caracterización de colonias microbianas [23]. Su usabilidad es debido a su gran compatibilidad que posee con múltiples lenguajes de programación, como lo son Python y C++ así como la integración con frameworks de inteligencia artificial. Esta biblioteca permite el desarrollo de soluciones eficientes y escalables orientadas a la automatización de procesos.

En la Figura 7 se describen los principales factores que contribuyen a la versatilidad de OpenCV, tales como su naturaleza de código abierto, el aprendizaje automático, la visión por computadora y la compatibilidad de lenguajes [24].



**Figura 7.** Proceso de análisis para una imagen.

No obstante, la utilización de librerías como OpenCV para el procesamiento de imágenes no solo se basa en su implementación y en la utilización de funciones, sino también en la calidad de la imagen que se procesará. En este contexto, los siguientes son los parámetros clave que influyen directamente en la precisión de los algoritmos de visión artificial:

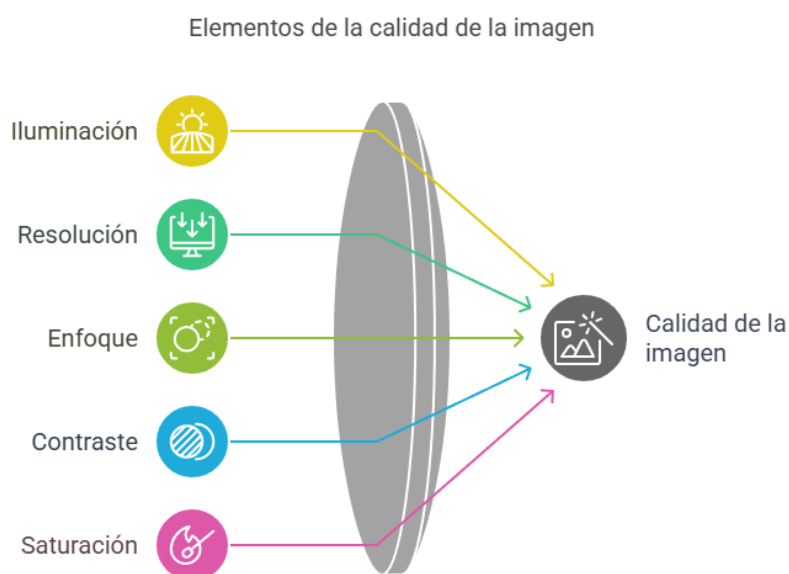
- **Iluminación:** El tipo de luz y su cantidad pueden influir en el contraste y la visibilidad de rasgos específicos. Tiene el propósito de minimizar sombras y reflejos, facilitando la segmentación y extracción de características por los algoritmos [25].
- **Enfoque:** Las imágenes desenfocadas complican la identificación de los bordes, es decir, reducen la efectividad de los algoritmos de detección y conteo [26].
- **Resolución:** Influye en la distinción del objeto cuando sea procesado, sin embargo, mientras esta sea mayor, requiere mayor tiempo de análisis [27].
- **Ruido en la imagen:** La presencia de píxeles aleatorios influye en la precisión en los algoritmos de contornos y segmentación, provocando los falsos positivos o negativos [28].

En la Tabla 6 se presentan los principales parámetros técnicos recomendados para llevar a cabo el procesamiento de una imagen en aplicaciones de visión computacional. Esta información permite establecer los rangos óptimos de los aspectos mencionados para garantizar un desempeño adecuado.

**Tabla 6.** Parámetros de calidad en una imagen.

Técnica de IA	Unidad de medida	Intervalo recomendado
Iluminación	Lux (lx)	200 –1000 lx
Enfoque	Métrica de nitidez (Laplaciano)	> 300l
Resolución	Píxeles (DPI)	≥ 1024x1024 px / 300 – 600 dpi
Ruido	SNR (dB)	> 20 dB

En resumen, una imagen de alta resolución, con adecuada iluminación, enfoque, calibración y libre de ruido, es fundamental para que los algoritmos de visión artificial puedan ejecutar un procesamiento y análisis precisos. Debido a que calidad de la imagen influye directamente en la efectividad de tareas como la identificación, segmentación y evaluación de los objetos de interés. Así, la Figura 8 presenta los principales elementos que inciden en la calidad de una imagen.



**Figura 8.** Principales elementos de la calidad en una imagen.

#### 4. CONCLUSIONES

En esta revisión sistemática, se tuvo el objetivo de analizar el estado del arte de los procedimientos aplicados en el análisis microbiológico, particularmente en tareas como el conteo automático, la segmentación, y la identificación de colonias microbianas. Durante este proceso se recopilaron y evaluaron estudios relevantes que integran múltiples enfoques tradicionales de procesamiento digital de imágenes y técnicas recientes basadas en inteligencia artificial, con el objetivo de identificar los métodos, herramientas y parámetros más utilizados en esta área de investigación.

Entre los hallazgos más relevantes se destaca el uso de Python, debido a su adaptabilidad y extensa compatibilidad con bibliotecas especializadas en visión computacional como lo es OpenCV. Esta librería de código abierto ha demostrado ser importante en el desarrollo de sistemas de visión artificial ya que permite realizar múltiples operaciones como: filtrado, detección de contornos, análisis morfológico y segmentación. Asimismo, se reconoció que la calidad de la

imagen influye directamente en desempeño de los algoritmos, considerando aspectos como resolución, enfoque, ruido e iluminación.

Además, se observó que una gran cantidad de equipos comerciales empleados en laboratorios son costosos y requieren una infraestructura especializada, limitando su adquisición. Esta circunstancia subraya la relevancia de desarrollar herramientas asequibles, que faciliten la implementación de las nuevas tecnológicas en el campo de la microbiología.

En cuanto a la metodología utilizada, las investigaciones examinadas utilizaron modelos supervisados con CNN, como segmentación semántica e identificación de objetos. Estos procedimientos han evidenciado una alta precisión en la categorización y segmentación de imágenes con estructuras complejas.

Como propuestas para futuros estudios, se propone investigar modelos mixtos que fusionen visión artificial con inteligencia artificial explicable (XAI), con el objetivo de ofrecer resultados exactos, aspecto crucial para su aceptación en contextos clínicos e investigativos.

Finalmente, los hallazgos de esta revisión no solo reflejan avances en la automatización microbiológica, sino que también sientan las bases para el desarrollo de una futura aplicación móvil. Dicha aplicación permitiría implementar los métodos tradicionales de procesamiento de imágenes junto con una red neuronal, ofreciendo una herramienta práctica, accesible y eficiente, capaz de realizar conteos automáticos y segmentación de colonias microbianas.

## REFERENCIAS

- [1] B. S. Cruz Florez, B. R. Gómez Torres, y L. C. Sanchez Leal, “Aplicaciones de la Inteligencia Artificial en Microbiología Agroambiental”, *ReCIBE, Revista electrónica de Computación, Informática, Biomédica y Electrónica*, vol. 13, no. 2, pp. C2-25, Sep. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.32870/recibe.v13i2.362>
- [2] P. J. Flores Medina, P. Garibay Murillo, y G. R. Peñaloza Mendoza, “Automation of inoculation in culture media for the microbiology laboratory”, *Revista de Ciencias Tecnológicas*, vol. 6, no. 4, Nov. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.37636/recit.v6n4e285>
- [3] M. Muñoz-Algarra, R. Martínez-Ruiz, y B. Orden-Martínez, “Evaluación del sistema automatizado UF-1000i en el diagnóstico de infección urinaria”, *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, vol. 31, no. 1, pp. 29–31, Jan. 2013. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eimc.2012.05.017>
- [4] R. Medeot, J. Mena, P. Rodríguez, P. Herrera Najum, L. López, y M. S. Muñoz, “Evaluaciones pre y post reprocesamiento manual y automatizado de endoscopios: aislamiento microbiológico”, *Acta Gastroenterológica Latinoamericana*, vol. 54, no. 3, pp. 254–261, Sep. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.52787/agl.v54i3.423>
- [5] E. P. Sánchez, D. Núñez, R. O. Cruz, M. A. Torres, y E. V. Herrera, “Simulación y Conteo de Unidades Formadoras de Colonias – Simulation and Counting of Colony-Forming Units”, *ReCIBE, Revista Electrónica de Computación, Informática, Biomédica y Electrónica*, vol. 6, núm. 1, pp. 97-111, Dec. 2017. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.32870/recibe.v6i1.70>
- [6] Cientisol, “Contadores de colonias: tipos y aplicaciones”, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://cientisol.com/contadores-de-colonias/>

- [7] H. Munguía-Orozco, “Construcción de un modelo basado en redes neuronales profundas de código abierto para el conteo, localización y clasificación de colonias en placas de Petri”, ITESO, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://rei.iteso.mx/server/api/core/bitstreams/98df12f5-3c0e-4dcd-8c3d-e2ee2a0d77f9/content>
- [8] M. T. Madigan, K. S. Bender, D. H. Buckley, W. M. Sattley, y D. A. Stahl, *Brock Biology of Microorganisms*, 15th ed. Boston, MA, USA: Pearson, 2021.
- [9] D. J. Hardy, “Practical Aspects and Considerations When Planning a New Clinical Microbiology Laboratory”, *Clinics in Laboratory Medicine*, vol. 40, no. 4, pp. 421-431, Dec. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cll.2020.08.015>
- [10] B. Kitchenham y S. Charters, *Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering*, 2007.
- [11] A. Rehman, Z. Saleem, J. Amjad, S. R. Shah, y K. Siddique, “A Comparison of Bacterial Colonies Count from Petri Dishes Utilizing Hough Transform and Traditional Manual Counting”, *arXiv*, May. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.20365>
- [12] S. Albaradei, F. Napolitano, M. Uludag, M. Thafar, S. Napolitano, M. Essack, V. B. Bajic, y X. Gao, “Automated counting of colony forming units using deep transfer learning from a model for congested scenes analysis”, *IEEE Access*, vol.8, pp. 164340-164346, Sep. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3021656>
- [13] L. F. Coca, Z. P. Franco, y A. Pateti, “Implementación de filtros morfológicos utilizados en el procesamiento de imágenes digitales en un dispositivo lógico programable”, *Univ. Cienc. Tecnol.*, vol. 12, no. 48, pp. 171–182, 2008. [En línea]. Disponible en: [https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1316-48212008000300008&script=sci\\_arttext](https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1316-48212008000300008&script=sci_arttext)
- [14] N. Triana, A. E. Jaramillo, R. M. Gutiérrez, y C. A. Rodríguez, “Técnicas de umbralización para el procesamiento digital de imágenes de GEM-Foils”, *Scientia et Technica*, vol. 21, no. 4, pp. 352–359, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/13271>
- [15] J. M. Llamas, “Reconocimiento de imágenes mediante redes neuronales convolucionales”, Tesis de grado, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://oa.upm.es/53050/>
- [16] O. A. Soto Orozco, A. D. Corral Sáenz, C. E. Rojo González, y J. A. Ramírez Quintana, “Análisis del desempeño de redes neuronales profundas para segmentación semántica en hardware limitado”, *ReCIBE. Rev. Electrón. Comput., Inform., Bioméd. Electrón.*, vol. 8, no. 2, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.32870/recibe.v8i2.142>
- [17] P. M. Rodrigues, J. Luís, y F. K. Tavaría, “Image Analysis Semi-Automatic System for Colony-Forming-Unit Counting”, *Bioengineering*, vol. 9, no. 7, p. 271, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/bioengineering9070271>
- [18] F. L. Badillo, C. A. R. Hernández, B. M. Narváez, y Y. E. A. Trillos, “Redes neuronales convolucionales: un modelo de Deep Learning en imágenes diagnósticas. Revisión de tema”, *Rev. Colomb. Radiol.*, vol. 32, no. 3, p. 5591, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://rcr.acronline.org/index.php/rcr/article/view/161>



- [19] A. B. Schroeder, E. T. Dobson, C. T. Rueden, P. Tomancak, F. Jug, y K. W. Eliceiri, “The ImageJ ecosystem: Open-source software for image visualization, processing, and analysis”, *Protein Sci.*, vol. 30, no. 1, pp. 234–249, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/pro.3993>
- [20] L. Fernández, y P. Ramírez, “Procesamiento digital de imágenes para el análisis microbiológico: revisión y perspectivas”, *Computación y Sistemas*, vol. 25, no. 4, pp. 789–798, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.cys.cic.ipn.mx/ojs/index.php/CyS/article/view/3352>
- [21] M. Roynard, E. Carlinet, y T. Géraud, “A Modern C++ Point of View of Programming in Image Processing”, *Conf. Generative Programming: Concepts and Experiences*, Auckland, Nueva Zelanda, pp. 164–171, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1145/3564719.3568692>
- [22] M. Charbit, Ed., *Digital Signal and Image Processing Using MATLAB*, vol. 666. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2010.
- [23] S. Gollapudi, *Learn Computer Vision Using OpenCV: With Deep Learning CNNs and RNNs*. Berkeley, CA: Apress, 2019.
- [24] M. Nixon y A. Aguado, *Feature Extraction and Image Processing for Computer Vision*, 5th ed. Academic Press, 2019.
- [25] M. Khan, S. Chakraborty, R. Astya, y S. Khepra, “Face detection and recognition using OpenCV”, *Conf. Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS)*, Greater Noida, India, pp. 116–119, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ICCCIS48478.2019.8974493>
- [26] H. Singh, *Practical Machine Learning and Image Processing: For Facial Recognition, Object Detection, and Pattern Recognition Using Python*, Berkeley, CA: Apress, 2019.
- [27] A. A. Khan, A. A. Laghari, y S. A. Awan, “Machine Learning in Computer Vision: A Review”, *EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems*, vol. 8, no. 32, Abr. 2021, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.4108/eai.21-4-2021.169418>
- [28] R. Szeliski, *Computer Vision: Algorithms and Applications*, 2nd ed. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2022.



# Visión artificial para el diagnóstico de suelos cafetaleros: revisión sistemática de la literatura

## *(Machine Vision for the Diagnosis of Coffee Soils: A Systematic Literature Review)*

Aldrich Arath Irisson Aburto<sup>1</sup>, María Salomé Alejandre Apolinar<sup>1</sup>, Hugo Amores Pérez<sup>1</sup>,  
Yadeneyro de la Cruz Elizondo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> TecNM/Instituto Tecnológico Superior de Xalapa, Xalapa, México

<sup>2</sup> Universidad Veracruzana, Xalapa, México

[247001212@itsx.edu.mx](mailto:247001212@itsx.edu.mx), [salome.aa@xalapa.tecnm.mx](mailto:salome.aa@xalapa.tecnm.mx), [hugo.ap@xalapa.tecnm.mx](mailto:hugo.ap@xalapa.tecnm.mx), [ydelacruz@uv.mx](mailto:ydelacruz@uv.mx)

**Resumen:** En Jilotepec, Veracruz, la producción de café enfrenta retos asociados con la degradación del suelo y la baja productividad agrícola. Este trabajo se enfoca en una Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) sobre el uso de visión artificial para el diagnóstico de suelos cafetaleros, con el fin de identificar técnicas efectivas que permitan desarrollar herramientas tecnológicas aplicables al contexto local. La RSL se realizó bajo un protocolo riguroso que incluyó criterios de inclusión/exclusión, búsqueda en bases de datos científicas reconocidas y análisis temático de estudios entre 2019 y 2024. Los resultados destacan el potencial de la visión artificial en tareas como segmentación de imágenes, análisis de textura y detección de características fisicoquímicas del suelo. Como aporte principal, se identifican tendencias, vacíos y oportunidades que fundamentan la creación de un software de diagnóstico de suelos más rápido, accesible y preciso para cafetaleros. Esta investigación sienta las bases para soluciones innovadoras en agricultura sustentable y digital.

**Palabras clave:** Análisis de suelos, gestión agrícola, independencia tecnológica, segmentación de imágenes y tecnología asistida.

**Abstract:** In Jilotepec, Veracruz, coffee production faces challenges associated with soil degradation and low agricultural productivity. This work focuses on a Systematic Literature Review (SLR) on the use of computer vision for the diagnosis of coffee-growing soils, aiming to identify effective techniques that enable the development of technological tools applicable to the local context. The SLR was conducted under a rigorous protocol that included inclusion/exclusion criteria, a search in recognized scientific databases, and thematic analysis of studies between 2019 and 2024. The results highlight the potential of computer vision in tasks such as image segmentation, texture analysis, and the detection of physicochemical soil characteristics. As a main contribution, the review identifies trends, gaps, and opportunities that support the creation of faster, more accessible, and accurate soil diagnostic software for coffee producers. This research lays the groundwork for innovative solutions in sustainable and digital agriculture.

**Keywords:** Soil analysis, agricultural management, technological independence, image segmentation, assisted technology.

## 1. INTRODUCCIÓN

La cafecultura es una de las actividades agrícolas más representativas en México [1], no solo por su impacto económico en zonas rurales, sino también por su relevancia social, cultural y ambiental. Esta actividad tiene especial importancia en regiones montañosas como Jilotepec,

Veracruz, donde el cultivo del café constituye el eje central de la economía local y forma parte del modo de vida de las comunidades. En esta región, el 48 % de la superficie total está dedicada a actividades agrícolas, siendo el café el principal cultivo tanto en términos de superficie sembrada como de ingreso generado para los productores [2].

Sin embargo, en los últimos años la productividad de los cafetales en Jilotepec se ha visto amenazada por diversos factores, siendo uno de los más preocupantes la degradación progresiva del suelo. Esta problemática obedece, en gran medida, a prácticas inadecuadas de manejo agrícola, así como a procesos erosivos que se han intensificado debido a la compleja topografía del lugar y al impacto creciente del cambio climático [3]. Ante este panorama, se vuelve indispensable evaluar con precisión el estado actual del suelo con el fin de diseñar e implementar estrategias eficaces de conservación, restauración y mejora de las prácticas agrícolas que permitan garantizar la sostenibilidad de la producción cafetalera en el mediano y largo plazo.

Tradicionalmente, la evaluación de la calidad del suelo se realiza mediante procedimientos manuales de muestreo y análisis en laboratorio. Si bien estos métodos ofrecen resultados precisos y confiables, también presentan importantes limitaciones: suelen ser costosos, requieren de tiempo considerable y demandan recursos especializados que no siempre están al alcance de los pequeños productores [4]. Esto genera una barrera de acceso al diagnóstico del suelo, limitando la capacidad de muchos agricultores para tomar decisiones informadas sobre el manejo de sus parcelas.

En respuesta a estas limitaciones, la visión artificial ha emergido como una alternativa tecnológica prometedora para el diagnóstico del suelo y de los cultivos a partir del análisis automatizado de imágenes digitales. Esta tecnología permite detectar ciertas características físicas y químicas del terreno de manera más rápida y con menor necesidad de intervención humana, ofreciendo así una vía eficiente y escalable para obtener información útil sobre la condición del suelo [5], [6], [7].

No obstante, a pesar del potencial que representa esta tecnología, aún existe una brecha considerable en cuanto a su aplicación directa en cultivos específicos como el café, especialmente en contextos rurales donde el acceso a herramientas digitales es limitado y la infraestructura tecnológica es escasa. En particular, en regiones como Jilotepec, la integración de la Visión Artificial en los procesos agrícolas se encuentra en etapas tempranas, lo cual plantea tanto un reto como una oportunidad para el desarrollo de soluciones adaptadas a este entorno.

Con base en lo anterior, este artículo presenta una Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) orientada a identificar las técnicas de visión artificial más utilizadas en el diagnóstico de suelos agrícolas. El propósito de esta revisión es sentar las bases científicas necesarias para el desarrollo futuro de herramientas digitales que respondan a las características específicas de los cafetales de Jilotepec. Como aporte principal, se identifican los avances, vacíos y tendencias presentes en la literatura académica reciente, lo que permitirá orientar futuras investigaciones e iniciativas tecnológicas dirigidas al manejo sostenible del suelo en zonas cafetaleras.

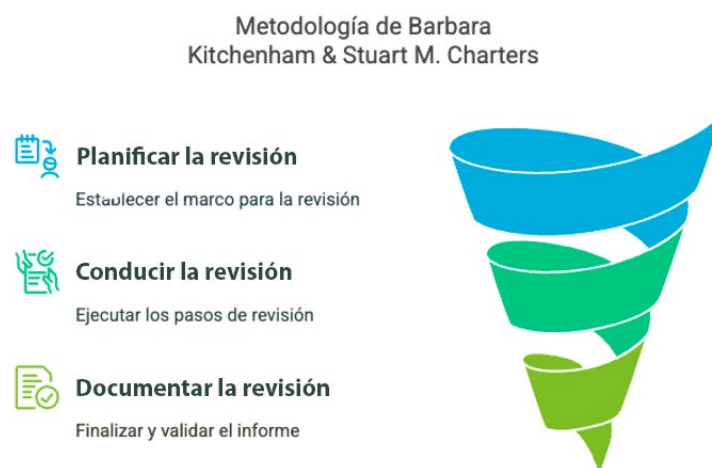
El artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección 2 se describe la metodología empleada para llevar a cabo la revisión sistemática; en la sección 3 se presentan los resultados obtenidos y su análisis correspondiente; y finalmente, en la sección 4 se discuten los hallazgos y se formulan conclusiones junto con posibles líneas de trabajo futuro.

## **2. METODOLOGÍA**

Este estudio se realizó bajo el enfoque metodológico propuesto por Barbara Kitchenham y Stuart M. Charters [8] para la elaboración de RSL en el ámbito de la ingeniería del software, el

cual ha sido adaptado rigurosamente al contexto de la visión artificial aplicada al diagnóstico de suelos agrícolas, particularmente en cultivos de café. Esta metodología proporciona un marco estructurado que asegura la trazabilidad, transparencia, objetividad y replicabilidad de cada una de las etapas de la revisión.

La aplicación de este enfoque permite construir un mapa actualizado del conocimiento disponible, identificar vacíos en la literatura y guiar futuras investigaciones con una base sólida (ver Figura 1).



**Figura 1.** Fases de la metodología RSL de acuerdo con [8]

## 2.1. Procedimiento

### Fase 1. Planificar la revisión

Durante esta fase inicial, se estableció un protocolo que dirigió todo el proceso de revisión. El protocolo incluyó los siguientes elementos clave:

- **Pregunta principal de investigación:**  
¿Qué técnicas de visión artificial se han aplicado exitosamente al diagnóstico de suelos agrícolas?
- **Objetivo:**  
Identificar, clasificar y analizar las técnicas de visión artificial utilizadas en el diagnóstico de suelos agrícolas, especialmente aquellas con potencial de aplicación en cafetales.
- **Criterios de inclusión:**  
Se consideraron artículos publicados entre 2019 y 2024, redactados en inglés o español, disponibles en texto completo y revisados por pares, que presenten una aplicación concreta de técnicas de visión artificial al análisis de suelos.
- **Criterios de exclusión:**  
Se excluyeron trabajos sin relación directa con el análisis de suelos, artículos duplicados, estudios sin acceso completo (solo resumen) y publicaciones de carácter teórico u opinativo sin evidencia empírica o técnica.

Para localizar la literatura relevante, se diseñaron y aplicaron cadenas de búsqueda utilizando operadores booleanos y términos controlados, contruidos a partir de un conjunto de conceptos clave y sus respectivos sinónimos. La Tabla 1 muestra los términos principales considerados para las búsquedas.

**Tabla 1.** Términos clave y sinónimos

<b>Términos</b>	<b>Sinónimos</b>
<b>“computer vision”</b>	machine vision, deep learning
<b>“soil quality assessment”</b>	soil evaluation, agricultural soil analysis

A partir de estos términos, se formularon diversas cadenas de búsqueda, las cuales se aplicaron en las bases de datos seleccionadas para recuperar el mayor número de estudios relevantes posibles. La Tabla 2 presenta las cadenas de búsqueda utilizadas.

**Tabla 2.** Cadenas de búsqueda

<b>ID</b>	<b>Cadena de búsqueda</b>
<b>C1</b>	("computer vision" OR "machine vision" OR "deep learning") AND ("soil quality assessment" OR "soil evaluation" OR "agricultural soil analysis")
<b>C2</b>	("computer vision" OR "machine vision" OR "deep learning") AND ("soil assessment" OR "soil evaluation" OR "soil analysis")
<b>C3</b>	("computer vision" OR "machine vision" OR "deep learning") AND ("soil quality" OR "soil evaluation" OR "soil analysis")

Estas cadenas de búsqueda se ejecutaron en las bases de datos académicas más relevantes en el área, seleccionadas por su cobertura, especialización temática y relevancia científica. La Tabla 3 presenta el criterio de elección de cada base de datos utilizada.

**Tabla 3.** Bases de datos para la búsqueda de literatura

<b>Base de datos académicas</b>	<b>Criterio de elección</b>
<b>Google Scholar</b>	Motor de búsqueda académico amplio que indexa literatura científica de diversas fuentes, incluyendo ScienceDirect, MDPI, ResearchGate y otras plataformas. Es útil para acceder a trabajos interdisciplinarios.
<b>IEEE Xplore</b>	Base de datos especializada en ingeniería eléctrica, electrónica y ciencias computacionales. Contiene artículos altamente técnicos y relevantes para el análisis automatizado de imágenes.
<b>Springer Nature Link</b>	Repositorio multidisciplinario de publicaciones científicas que incluye libros, artículos de revistas y conferencias. Su cobertura en ciencias aplicadas permite encontrar estudios en agrotecnología y visión computacional.
<b>ACM Digital Library</b>	Fuente clave para investigaciones en ciencias de la computación. Incluye artículos revisados por pares relacionados con algoritmos, procesamiento de imágenes y tecnologías emergentes aplicadas al análisis agrícola.
<b>Consensus</b>	Plataforma basada en inteligencia artificial diseñada para sintetizar resultados de investigación científica de múltiples disciplinas. Permite acceder a respuestas respaldadas por evidencia a partir de literatura revisada por pares, siendo útil para identificar enfoques actualizados y tendencias emergentes en temas especializados.

## Fase 2. Conducir la revisión

Una vez definidas las cadenas de búsqueda, se procedió a su ejecución sistemática en cada una de las bases de datos académicas seleccionadas. El objetivo de esta fase fue identificar cuál de las combinaciones de términos ofrecía un mayor número de resultados relevantes, permitiendo así maximizar la recuperación de literatura potencialmente útil para el estudio. Las búsquedas fueron realizadas durante el mes de febrero del año 2025, siguiendo un mismo criterio de aplicación en todas las plataformas para asegurar la uniformidad del procedimiento.

Posteriormente, se aplicó un primer filtrado a los resultados obtenidos, considerando los criterios de inclusión definidos previamente: intervalo de publicación entre los años 2019 y 2024, idioma inglés o español, disponibilidad en texto completo y clasificación como artículos académicos revisados por pares. Esta depuración inicial permitió eliminar estudios que no cumplían con las condiciones mínimas de calidad y pertinencia, así como duplicados o documentos sin acceso libre, así como detectar la cadena que da mayor cantidad de resultados.

Con base en los artículos resultantes de la mejor cadena de búsqueda, se llevó a cabo una segunda ronda de filtrado. En esta etapa se revisaron los títulos de los estudios para evaluar su pertinencia específica con el objeto de estudio, y se eliminaron aquellos que estaban duplicados o que no abordaban directamente la aplicación de visión artificial en el diagnóstico de suelos agrícolas. Este paso sirvió para asegurar la precisión y relevancia de la literatura seleccionada para el análisis final.

## Fase 3. Documentar la revisión

Los documentos seleccionados se analizaron en profundidad en la tercera fase del estudio, con el objetivo de identificar patrones, técnicas recurrentes, algoritmos utilizados, tipos de datos procesados y contextos de aplicación relacionados con la visión artificial y el análisis de suelos.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la Fase 2 se presentan de forma resumida en la Tabla 4, donde se muestra la cantidad total de documentos recuperados por cada cadena de búsqueda (C1, C2 y C3) en cada una de las bases de datos.

**Tabla 4.** Resultados de búsqueda general de literatura

Base de datos académica	C1	C2	C3
Google Scholar	666	4.800	10.700
IEEE	3	35	73
ACM	5	19	75
Springer Nature Link	31	302	867
Consensus	37	66	120
<b>Total</b>	<b>742</b>	<b>5.222</b>	<b>11.835</b>

Como puede observarse, la cadena de búsqueda C3 generó el mayor número de resultados en todas las bases de datos, superando ampliamente a C1 y C2. Esto sugiere que C3 posee una estructura de términos más amplia y efectiva para abarcar el enfoque temático del estudio.

La Tabla 5 muestra la comparación entre los resultados totales y los artículos que cumplieron con los criterios de aceptación.



**Tabla 5.** Resultados de la aplicación de los criterios de aceptación

<b>Base de datos académica</b>	<b>C1</b>		<b>C2</b>		<b>C3</b>	
<b>Google Scholar</b>	666	→ 97	4.800	→ 572	10.700	→ 1.530
<b>IEEE</b>	3	→ 0	35	→ 1	73	→ 2
<b>ACM</b>	5	→ 5	19	→ 18	75	→ 73
<b>Springer Nature Link</b>	31	→ 2	302	→ 32	867	→ 87
<b>Consensus</b>	37	→ 12	66	→ 34	120	→ 15
<b>Total</b>	742	→ 116	5.222	→ 657	11.835	→ 1.707

A partir de esta comparación, se concluyó que la cadena de búsqueda C3 no solo era la que generaba mayor cantidad de resultados, sino también la que conservaba el mayor número de artículos relevantes tras aplicar los filtros de inclusión. Por esta razón, se eligió la cadena C3 como la cadena principal para el proceso de selección final. La Tabla 6 presenta el número definitivo de artículos considerados por base de datos.

**Tabla 6.** Filtrado final de literatura

<b>Base de datos académica</b>	<b>Filtrado 1</b>	<b>Filtrado 2</b>	<b>Filtrado 3</b>
<b>Google Scholar</b>	10.700	1.530	20
<b>IEEE</b>	73	2	2
<b>ACM</b>	75	73	4
<b>Springer Nature Link</b>	867	87	8
<b>Consensus</b>	120	15	6
<b>Total</b>	11.835	1.707	40

El proceso de filtrado descrito dio como resultado un conjunto final de cuarenta (40) artículos altamente relevantes que constituyen la base documental de esta Revisión Sistemática de la Literatura. Estos documentos fueron analizados en profundidad en la fase 3 del estudio, y en la Tabla 7 se muestra veintitrés (23) artículos del conjunto final, a modo de representación de los hallazgos obtenidos.

Los veintitrés (23) artículos incluidos en la Tabla 7 comparten como objetivo principal la mejora o automatización de la evaluación del suelo o de condiciones relacionadas mediante visión artificial. Algunos trabajos se enfocan en desarrollar modelos precisos para segmentación de residuos agrícolas [9], otros en predecir propiedades como textura del suelo con imágenes tomadas por smartphones [10], mientras que algunos ofrecen revisiones amplias del estado del arte en clasificación de suelos [6], [13]. Además, se identificaron propuestas novedosas como CollembolAI, que, aunque no evalúa el suelo directamente, utiliza visión artificial para analizar bioindicadores asociados a su calidad [11].

**Tabla 7.** Análisis de literatura

Técnica	Algoritmo/ modelo	Cultivo o suelo	Datos utilizados	Resultados clave	Ventajas/ Desventajas	Base de datos académica	Año
<b>Visión artificial y deep learning</b>	U-Net	Suelo con residuos de maíz y soja	Imágenes RGB terrestres de alta resolución	89 % de precisión en segmentación de residuos	Alta precisión; requiere entrenamiento intensivo	Google Scholar [9]	2021
<b>Visión artificial y deep learning</b>	CNN, SVM, RF, VGGNet, ResNet50, PCA, K-Means	Suelos diversos	Imágenes de cámaras, móviles, satélite, sensores; bases creadas por autores	Precisión hasta 98,72 % con ResNet50, SVM > 95 %	Alta precisión; algunos métodos requieren alto poder de cómputo; posible bajo costo con móviles	Google Scholar [6]	2021
<b>Visión artificial con DLAC y CNN</b>	DLAC-CNN-RF	12 tipos de suelos (arcilla, limo, arena)	Imágenes de suelos capturadas con smartphone y datos de textura (hidrómetro)	Precisión de 99,67 % en la predicción de textura del suelo; R2 de 0,99; Mejor rendimiento que KNN y VGG16-RF	Alta precisión y bajo costo; requiere calibración del sistema y limitación en la distancia de la cámara	Consensus [10]	2022
<b>Macrofotografía, visión por computadora</b>	Faster R-CNN con SAHI (Detectron2)	Mesofauna del suelo (12 especies de Collembola y Acari)	36 imágenes compuestas, 5.671 anotaciones (entreno), 442 (prueba); cámara DSLR, muestras en etanol	Precisión 94 %, Recall 91,8 %, mAP@0.5 = 0,868; bajo 2,7 % de falsos positivos por fondo	Alta precisión, reutilizable, accesible; requiere anotación inicial y buena calidad de imagen	Consensus [11]	2022

<b>Revisión de visión artificial + DL</b>	CNN, YOLO, SSD, GANs, ViT	Múltiples cultivos y suelos agrícolas	Imágenes RGB/hiperespectrales, UAV, sensores, bases de datos públicas y privadas	Alta precisión (>95 %) en tareas de detección; generación sintética de datos con GANs	Cobertura completa; desafíos de datos masivos, potencia computacional y variabilidad en campo	Consensus [12]	2022
<b>Visión por computadora basada en texturas y colores</b>	SVM (Sel_FS), ANN, MR, DT	Ocho clases de suelo (clay, sandy, silt, etc.)	38,912 imágenes RGB (aumentadas) capturadas con smartphone + características seleccionadas	Precisión de 99,79 % con SVM; mejora sobre estudios previos en ~37 %	Alta precisión, sistema económico y portátil; necesita anotación manual y selección de características óptima	Springer Nature Link [13]	2022
<b>Big Data, Visión artificial, IoT</b>	CNN, RNN, DBN, GAN, DRN, sensores IoT	Diversos cultivos (general)	Sensores, UAVs, imágenes, IoT, datos abiertos, plataformas en la nube	Alta aplicabilidad tecnológica, pero con retos en datos, infraestructura y adopción	Muy completo y actualizado; no enfocado en un cultivo o suelo específico	ACM [14]	2023
<b>Procesamiento o satelital, DL</b>	DLCA (CNN, K-means, KNN, NB)	Arroz (paddy), suelos de Thanjavur	Imágenes Sentinel-2, Landsat, Copernicus (2019)	98,52 % de precisión, F1-score 99,02 %, MCC 98,43 %	Alta precisión y cobertura multietapa; requiere preprocesamiento y recursos de cómputo	ACM [15]	2023
<b>Deep Learning</b>	DNNR	Suelos rojos y negros (India)	Datos de laboratorio (pH, OC, P, K), sensores IoT, humedad, temperatura (2016–2020)	Precisión del 96,7 % en predicción de calidad; mejor que ANN, KNN y otros modelos previos	Alta precisión, eficiente y adaptable; no incluye visión artificial; requiere datos bien preprocesados	Consensus [16]	2023

<b>Visión artificial</b>	SSD MobileNet v2, EfficientDet D0	Plantas con clorosis férrica	Imágenes de hojas (web), anotadas con LabelImg	mAP: 22 (SSD), 33,6 (EfficientDet); Precisión > 98 %	Alta precisión; EfficientDet más lento pero más exacto	IEEE [17]	2023
<b>Visión artificial (CNN)</b>	U-Net con EfficientNet-B4	Trigo	Más de 120.000 imágenes RGB top-down (2017–2021), múltiples sitios y condiciones	Precisión > 94 % en Dice e IoU; segmentación robusta del dosel vegetal	Alta precisión, no destructivo, escalable; requiere entrenamiento con muchos datos	Springer Nature Link [18]	2023
<b>Teledetección, deep learning</b>	CNN, NDVI	Franco-arcilloso y arcilloso; trigo, guisante, forrajes	Imágenes Landsat 2013–2022, NDVI, 275 puntos de control, muestreo de suelos	Precisión >0,95 (CNN); NDVI ↑ 0,19; mejoras en EC, Mg, limo, etc.	Alta precisión y cobertura espacial; Limitación por resolución Landsat y condiciones de humedad variables	Springer Nature Link [19]	2023
<b>Visión, señales RF (Wi-Fi)</b>	ResNet, modelado matemático	Suelo agrícola, mezcla arena/compost	Imágenes de smartphone, señales Wi-Fi, sensores comerciales	91 % de R <sup>2</sup> sin secado de muestra; bajo costo y buena precisión	Bajo costo; sin preparación; menor precisión en suelos naturales con baja variabilidad	ACM [20]	2024
<b>Machine Learning</b>	SVM, ID3, C4.5, Random Forest	Suelo: Arenoso, arcilloso y franco	Sensores de campo, portales ICAR/TNAU, observación de síntomas	Reglas de correlación para recomendar abonos según deficiencias y tipo de suelo	Reglas detalladas y prácticas; no se enfoca en visión artificial, resultados aún teóricos	ACM [21]	2024

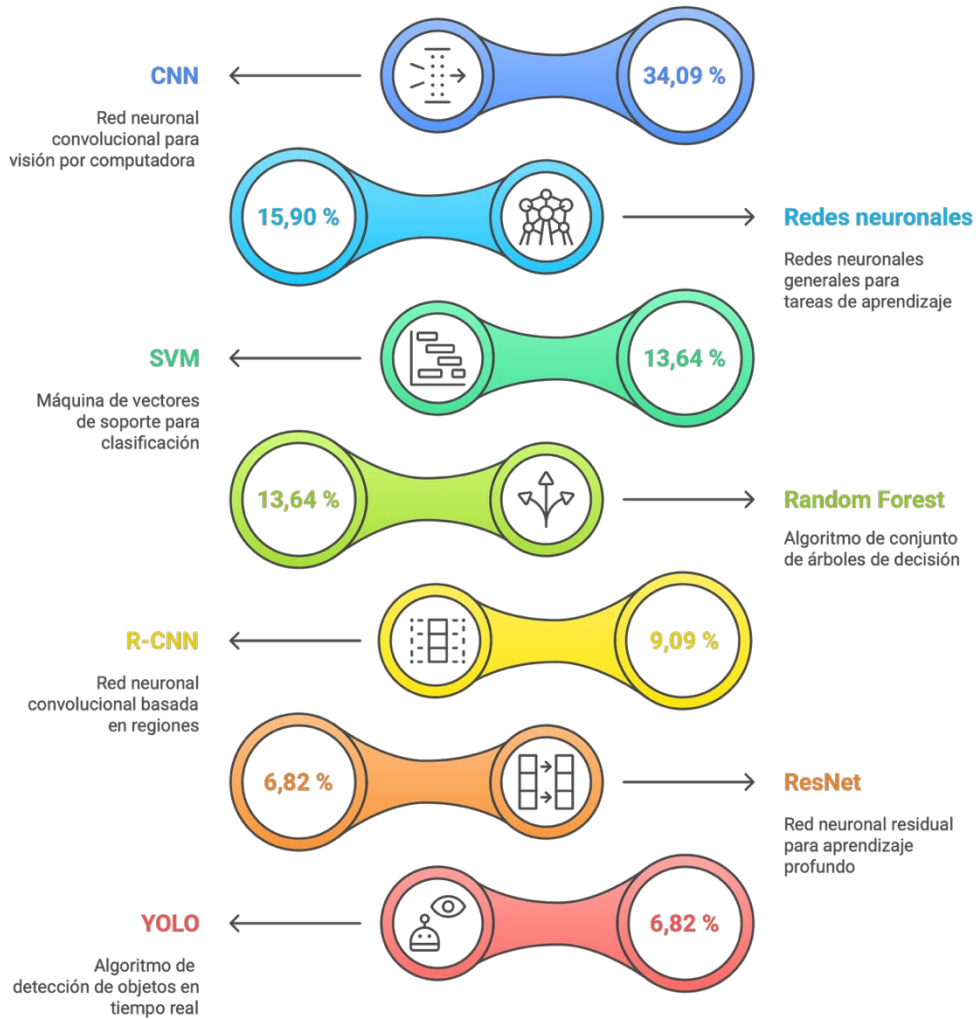
<b>Revisión de visión por computadora y aprendizaje profundo</b>	CNN, YOLO, ViT, GANs, SVM, etc.	Diversos cultivos (trigo, tomate, arroz, etc.)	Imágenes RGB, térmicas, hiperespectrales y multiespectrales; datasets públicos y de campo	Precisión > 99 % en modelos personalizados; mejoras en diagnóstico y eficiencia agrícola	Alta precisión y automatización; requiere muchos datos etiquetados, gran poder de cómputo, problemas de interpretabilidad	Consensus [22]	2024
<b>ML, DL y visión satelital</b>	ANN, LSTM, GMA, PCA, HCA, GIS, RS	Suelo agrícola general	Propiedades físico-químicas y biológicas, imágenes satelitales	Modelos DL precisos; GMA mostró alta sensibilidad en Egipto	ML/DL permiten rapidez y precisión; requerimientos computacionales altos	Consensus [23]	2024
<b>Imágenes hiperespectral es, ML</b>	CNN, SVM, XGBoost, etc.	Suelos agrícolas con distintas propiedades	Imágenes HSI (satélite, drones, sensores terrestres), muestras físicas	Alta precisión en estimación de SOC, textura, humedad, metales pesados y nutrientes	No destructivo; alta precisión; alto costo; necesidad de gran preprocesamiento	Google Scholar [24]	2024
<b>Visión artificial (DL)</b>	YOLO, Mask R-CNN, U-Net, EfficientNet, CNN	Cultivos hortícolas en invernadero	Imágenes RGB, térmicas, hiperespectrales, sensores IoT, drones	Alta precisión en monitoreo, detección y automatización agrícola en invernaderos	Revisión completa; técnicas modernas; necesidad de más datos etiquetados y robustez en entornos reales	IEEE [25]	2024
<b>IoT, aprendizaje profundo</b>	RNN con GRU + recomendaciones contrafactuales	Suelo para cultivo de café en Karnataka (India)	Datos de sensores IoT (20 semanas), 640 muestras históricas, app móvil, AWS Cloud	Precisión 94,25 %; mejor que SVM, GAN, FFNN, etc. Transformación real de suelos	Alta precisión y usabilidad; alto costo de hardware, desafíos en climas extremos y adopción por pequeños agricultores	Springer Nature Link [26]	2024



<b>Revisión de CNN en visión artificial</b>	CNN (VGG, ResNet, DenseNet, ViT, etc.)	Cultivo de papa	Imágenes RGB (2–6 clases); datasets de 900–10.000 imágenes; múltiples países	Precisión hasta 99,98 % con Deep Ensemble; modelos robustos y generalizables	Alta precisión y múltiples enfoques; limitaciones en datos, variabilidad de síntomas y costos computacionales	Springer Nature Link [27]	2024
<b>Visión espectral. IA en madurez de frutas</b>	SVM, RF, ANN, KNN, clustering	Frutas (manzana, mango, etc.)	Datos de sensores destructivos y no destructivos (vis/NIR, HPLC, espectroscopía, etc.)	Modelos ML eficientes con fusión sensorial; mejores índices: °Brix, firmeza, color	Alta eficiencia y precisión; necesita calibración por tipo de fruta y dataset extenso	Springer Nature Link [28]	2024
<b>Agro-deep learning, visión artificial</b>	ADLF (CNN, DL)	Cultivos globales (arroz, trigo, etc.)	56.717 muestras; imágenes satelitales, sensores IoT, clima, Kaggle dataset	Precisión 84,87 %, F1-score 88,91 %, mejor que SVM, RF, DLBO, etc.	Altamente preciso, adaptable y eficiente; complejo de entrenar, requiere múltiples fuentes de datos	Springer Nature Link [29]	2024
<b>Visión artificial, MLP, CNN</b>	WaveVision Net (MLP+CNN +HDC)	Hojas de 26 variedades de mango	16.646 imágenes (MangoFolioBD); cámaras móviles; datos aumentados y con ruido	Precisión 97,23 % sin ruido, 95,21 % con ruido; AUC 0,9831; F1 = 0,9544	Alta precisión y robustez; necesita entrenamiento intensivo y hardware compatible para despliegue	Springer Nature Link [30]	2024

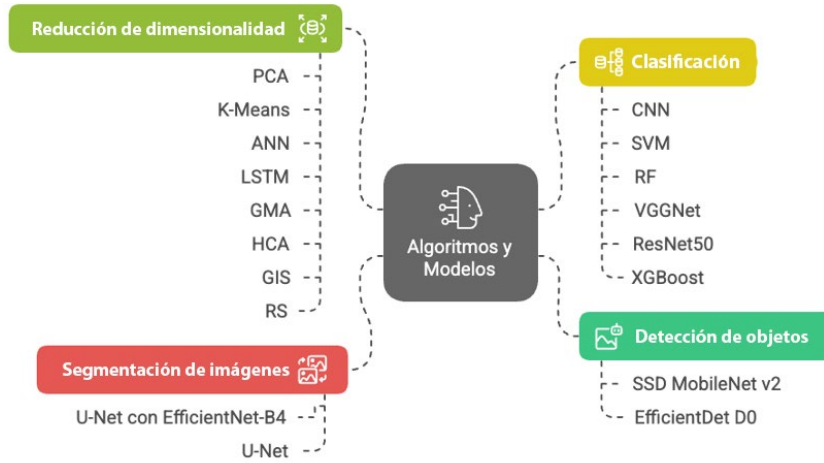
La técnica predominante fue el uso de redes neuronales convolucionales (CNN), presente en la mayoría de los artículos [6], [10], [12], [19], [27], (ver Figura 2). En particular, modelos como U-Net [9], [18], R-CNN, YOLO, ResNet y variantes personalizadas como DLAC-CNN-RF [10] demostraron alta eficacia en tareas de clasificación y segmentación (ver Figura 3). También se observaron técnicas de aprendizaje profundo combinadas con métodos estadísticos como Random Forest y SVM, lo cual permite mejorar la robustez de los modelos [13], [21].

### Distribución de la popularidad del algoritmo de aprendizaje automático



**Figura 2.** Principales algoritmos/modelos de análisis

### Algoritmos y Modelos en Visión Artificial



**Figura 3.** Clasificación de algoritmos/modelos en visión artificial

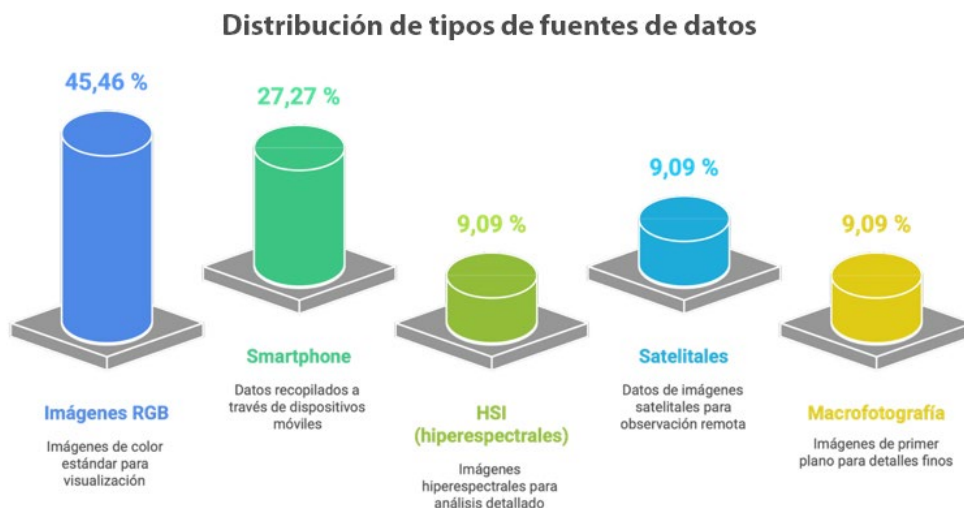
La diversidad de suelos fue notable. Se analizaron suelos arcillosos, arenosos, limosos, suelos de la India (Tamil Nadu), y agrícolas cubiertos con residuos de maíz o soya [9], [12], [22], [29]. En el caso de cultivos, se observaron aplicaciones en trigo, arroz, tomate, pepino, entre otros [14], [18], [25], (ver Figura 4). Algunos estudios no se centraron en un tipo de cultivo específico, sino en la clasificación de muestras de suelo a partir de sus propiedades físicas [24].

### Análisis de Tipos de Suelo y Cultivo

Tipo analizado	Porcentaje
Suelos diversos	20 %
Trigo	11,43 %
Maíz	8,57 %
Arroz	8,57 %
Tomate	8,57 %
Pepino	5,72 %
Otros/No especificado	37,14 %

**Figura 4.** Tipos de suelo y cultivos analizados

Las fuentes de datos más frecuentes fueron imágenes RGB, muchas de ellas capturadas por cámaras digitales, drones, o smartphones de alta gama [10], [13], [20]. También se emplearon imágenes hiperespectrales (HSI) y datos satelitales [19]. Algunos estudios utilizaron microscopía o sistemas de macrofotografía automatizados como parte de entornos experimentales personalizados [11] (ver Figura 5).



**Figura 5.** Fuentes de datos utilizadas

En términos de precisión, los modelos analizados lograron resultados destacados: U-Net superó el 89 % [9], y DLAC-CNN-RF alcanzó un rendimiento sobresaliente en predicción de textura [10]. Modelos avanzados como X101-FPN con SAHI también mostraron una precisión promedio del 86 % en tareas especializadas [11]. Los autores coinciden en que las técnicas de visión artificial pueden sustituir o complementar métodos tradicionales de análisis de suelo, siempre que se ajusten a las condiciones locales y se disponga de datos suficientes [18], [29].

#### 4. CONCLUSIONES

Este estudio consistió en una RSL orientada a identificar y analizar las técnicas de visión artificial aplicadas al análisis de suelos agrícolas. La metodología implicó el examen exhaustivo de cuarenta artículos científicos, evaluados en función de su relevancia técnica y aplicabilidad práctica. Lo que permitió clasificar y comparar de manera sistemática los objetivos, algoritmos, tipos de suelo, fuentes de datos y principales hallazgos reportados en cada investigación.

Los hallazgos muestran que las CNN son las técnicas más empleadas, con modelos como U-Net, ResNet y DLAC-CNN-RF mostrando altos niveles de precisión en tareas de segmentación y clasificación. En cuanto a los datos, las imágenes RGB capturadas por smartphones o cámaras digitales fueron la fuente más común, aunque también se identificaron enfoques más avanzados con imágenes hiperespectrales o satelitales. Se abordaron diversos tipos de suelos y cultivos, lo que demuestra la versatilidad de estas herramientas.

Se concluye que la visión artificial representa una alternativa no destructiva, precisa y eficiente para el diagnóstico del suelo. Sin embargo, aún existen vacíos en la literatura, especialmente en aplicaciones dirigidas a cultivos como el café y en contextos rurales con bajo acceso tecnológico. Como trabajo futuro, se propone el desarrollo de modelos entrenados con datos locales y de bajo costo computacional, que permitan implementar soluciones reales en comunidades cafetaleras como las de Jilotepec, Veracruz.

## REFERENCIAS

- [1] A. C. Hernández, G. H. Martínez, y R. Manson, “La cafecultura mexicana: el caso del proyecto biocafé”, en *III Congresso Brasileiro de Agroecologia*, Florianópolis, Brasil, Oct. 2005. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/Hm4zAz>
- [2] SEFIPLAN, “Sistema de Información Estadística y Geográfica del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave (SIEGVER)”, Secretaría de Finanzas y Planeación, Jilotepec, Cuadernillos Municipales. Jilotepec, 2024. [En línea]. Disponible en: [https://cieg.gobiernodigital.gob.mx/wp-content/uploads/sites/21/2024/11/Jilotepec\\_CM\\_2024\\_Ver.2.pdf](https://cieg.gobiernodigital.gob.mx/wp-content/uploads/sites/21/2024/11/Jilotepec_CM_2024_Ver.2.pdf)
- [3] D. Geissert, A. Mólgora-Tapia, S. Negrete-Yankelevich, y R. Hunter Manson, “Efecto del manejo de la cobertura vegetal sobre la erosión hídrica en cafetales de sombra”, *AGROCIENCIA*, vol. 51, no. 2, pp. 119–133, Mar. 2017, [En línea]. Disponible en: <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1282>
- [4] O. Santillán, y M. E. Rentería Rodríguez, “Agricultura de Precisión”, Oficina de Información Científica y Tecnológica para el Congreso de la Unión [INCYTU], Ciudad de México, 15, Abr. 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.foroconsultivo.org.mx/INCYTU/index.php/notas/sociedad/94-15-agricultura-de-precision-n-2>
- [5] J. F. Sotomayor, A. P. Gómez, y A. F. Cela, “Sistema de Visión Artificial para el Análisis de Imágenes de Cultivo basado en Texturas Orientadas”, *Rev. Politécnica*, vol. 33, no. 1, Jan. 2014, [En línea]. Disponible en: [https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista\\_politecnica2/article/view/104](https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/104)
- [6] P. Srivastava, A. Shukla, y A. Bansal, “A comprehensive review on soil classification using deep learning and computer vision techniques”, *Multimed. Tools Appl.*, vol. 80, no. 10, pp. 14887–14914, Abr. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11042-021-10544-5>
- [7] M. Javaid, A. Haleem, I. H. Khan, y R. Suman, “Understanding the potential applications of Artificial Intelligence in Agriculture Sector”, *Adv. Agrochem*, vol. 2, no. 1, pp. 15–30, Oct. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.aac.2022.10.001>
- [8] B. Kitchenham, y S. Charters, “Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering”, vol. 2, Jul. 2007, [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/302924724>
- [9] F. A. Diaz-Gonzalez, J. Vuelvas, C. A. Correa, V. E. Vallejo, y D. Patino, “Machine learning and remote sensing techniques applied to estimate soil indicators – Review”, *Ecol. Indic.*, vol. 135, pp. 108517, Dec. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108517>
- [10] Z. Zhao, W. Feng, J. Xiao, X. Liu, S. Pan, y Z. Lian g, “Rapid and Accurate Prediction of Soil Texture Using an Image-Based Deep Learning Autoencoder Convolutional Neural Network Random Forest (DLAC-CNN-RF) Algorithm”, *MDPI*, vol. 12, no. 12, Dec. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/agronomy12123063>

- [11] S. Sys, S. Weißbach, L. Jakob, S. Gerber, y C. Schneider, “CollembolAI, a macrophotography and computer vision workflow to digitize and characterize samples of soil invertebrate communities preserved in fluid”, *Methods Ecol. Evol.*, vol. 13, no. 12, pp. 2729–2742, Oct. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14001>
- [12] V. G. Dhanya *et al.*, “Deep learning based computer vision approaches for smart agricultural applications”, *Artif. Intell. Agric.*, vol. 6, pp. 211–229, Sep. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2022.09.007>
- [13] M. Uddin, y Md. R. Hassan, “A novel feature based algorithm for soil type classification”, *Complex Intell. Syst.*, vol. 8, no. 4, pp. 3377–3393, Feb. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40747-022-00682-0>
- [14] D. Han, y M. Rodriguez, “Big Data Analytics, Data Science, ML&AI for Connected, Data-driven Precision Agriculture and Smart Farming Systems: Challenges and Future Directions”, en *Proceedings of Cyber-Physical Systems and Internet of Things Week 2023*, San Antonio TX USA: ACM, May 2023, pp. 378–384. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1145/3576914.3588337>
- [15] R. Sathiya Priya, y U. Rahamathunnisa, “A Novel Clustering Algorithm for Monitoring Paddy Growth Through Satellite Image Processing.”, *ACM Trans. Sens. Netw.*, p. 3579358, May 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1145/3579358>
- [16] P. Sumathi, V. V. Karthikeyan, M. S. Kavitha, y S. Karthik, “Improved Soil Quality Prediction Model Using Deep Learning for Smart Agriculture Systems”, *Comput. Syst. Sci. Eng.*, vol. 45, no. 2, pp. 1545–1559, Nov. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.32604/csse.2023.027580>
- [17] M. Majdalawieh, S. Khan, y Md. T. Islam, “Using Deep Learning Model to Identify Iron Chlorosis in Plants”, *IEEE Access*, vol. 11, pp. 46949–46955, May 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3273607>
- [18] M. Awais *et al.*, “AI and machine learning for soil analysis: an assessment of sustainable agricultural practices”, *Bioresour. Bioprocess.*, vol. 10, no. 1, p. 90, Dic. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s40643-023-00710-y>
- [19] M. Kazemi Garajeh, K. Hassangholizadeh, A. R. Bakhshi Lomer, A. Ranjbari, L. Ebadi, y M. Sadeghnejad, “Monitoring the impacts of crop residue cover on agricultural productivity and soil chemical and physical characteristics”, *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, p. 15054, Sep. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42367-9>
- [20] J. Ding, R. Chandra, R. Lal, y L. Tassiulas, “Cost-Effective Soil Carbon Sensing with Wi-Fi and Optical Signals”, en *Proceedings of the 30th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Washington D.C. DC USA: ACM, Dic. 2024, pp. 1015–1029. doi: <https://doi.org/10.1145/3636534.3690675>
- [21] B. R. A *et al.*, “Exploratory Study of Soil Parameters to Generate Correlations to Recommend Organic Manure”, en *Proceedings of the 2024 Sixteenth International Conference on Contemporary Computing*, Noida India: ACM, Aug. 2024, pp. 162–169. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1145/3675888.3676046>
- [22] A. Upadhyay *et al.*, “Deep learning and computer vision in plant disease detection: a comprehensive review of techniques, models, and trends in precision agriculture”, *Artif. Intell. Rev.*, vol. 58, no. 3, pp. 92, Dic. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10462-024-11100-x>



- [23] R. A. El Behairy *et al.*, “How Can Soil Quality Be Accurately and Quickly Studied? A Review”, *Agronomy*, vol. 14, no. 8, pp. 1682, Jul. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/agronomy14081682>
- [24] N. A. Sharma, K. Kumar, R. R. Chand, y M. A. Kabir, “Utilizing Hyperspectral Imaging with Machine Learning Techniques for Soil Analysis”, Feb. 2024. [En línea]. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-83127-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-83127-0_5)
- [25] J. U. M. Akbar, S. F. Kamarulzaman, A. J. M. Muzahid, Md. A. Rahman, y M. Uddin, “A Comprehensive Review on Deep Learning Assisted Computer Vision Techniques for Smart Greenhouse Agriculture”, *IEEE Access*, vol. 12, pp. 4485–4522, Jan. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3349418>
- [26] R. Selvanarayanan, S. Rajendran, S. Algburi, O. Ibrahim Khalaf, y H. Hamam, “Empowering coffee farming using counterfactual recommendation based RNN driven IoT integrated soil quality command system”, *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, p. 6269, Mar. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56954-x>
- [27] B. Gülmez, “A Comprehensive Review of Convolutional Neural Networks based Disease Detection Strategies in Potato Agriculture”, *Potato Res.*, Aug. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11540-024-09786-1>
- [28] M. Islam, S. Bijjahalli, T. Fahey, A. Gardi, R. Sabatini, y D. W. Lamb, “Destructive and non-destructive measurement approaches and the application of AI models in precision agriculture: a review”, *Precis. Agric.*, vol. 25, no. 3, pp. 1127–1180, Feb. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11119-024-10112-5>
- [29] J. Logeshwaran *et al.*, “Improving crop production using an agro-deep learning framework in precision agriculture”, *BMC Bioinformatics*, vol. 25, no. 1, pp. 341, Nov. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s12859-024-05970-9>
- [30] Md. F. Ul-Islam, A. Chakrabarty, R. Rahman, H. Moon, y Md. J. Piran, “Advancing mango leaf variant identification with a robust multi-layer perceptron model”, *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, p. 27406, Nov. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-74612-0>



# Rapid Assessment of Badea (*Passiflora quadrangularis* L.) Maturity Degree by Digital Image Analysis and Multivariate Statistical Techniques

*(Evaluación rápida del grado de madurez de badea (Passiflora quadrangularis L.) mediante análisis de imágenes digitales y técnicas estadísticas multivariantes)*

Luis Egas, Gina Guapi, Maribel Quelal-Vásquez  
Facultad de Ciencias de la Industria y Producción (FCIP), Universidad Técnica Estatal de Quevedo,  
Ecuador

*legasa@uteq.edu.ec, gguapi@uteq.edu.ec, mquelalv@uteq.edu.ec,*

**Abstract:** Fruits and vegetables are essential for a healthy diet worldwide, but due to their perishable nature, they are among the most wasted foods. According to the Food and Agriculture Organization (FAO), approximately 45% of food is lost before reaching consumers. Proper handling during and after harvest is crucial to reducing this waste, including identifying the optimal ripening point for both harvest and sale. *Passiflora quadrangularis* (badea), a traditional South American crop rich in antioxidants, generates significant income for vulnerable communities. Determining the ripeness of badea is key to ensuring better quality and reducing post-harvest losses. In this study, a physicochemical characterization was carried out by days of ripening, and images of the badea were used at three stages of ripeness: green-ripe, early-ripe, and ripe. The physicochemical characterization suggests average pH values of 5,73 and a maturity index of 11,62%, as indicators of an early ripening stage suitable for harvest. These images were analyzed using multivariate statistical methods, including Principal Component Analysis (PCA) and Partial Least Squares Discriminant Analysis (PLS-DA), to identify visual patterns and classify ripeness levels. The model achieved a training accuracy of 100% and a validation accuracy of 83%. These methodologies offer a fast and non-invasive method for assessing fruit ripeness, facilitating informed decisions about the optimal time for harvest and helping to reduce post-harvest waste.

**Keywords:** Maturity index, multivariate analysis, tropical fruit, RGB, PLS-DA.

**Resumen:** Las frutas y verduras esenciales para una dieta saludable a nivel mundial son de naturaleza perecible. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), aproximadamente el 45 % de los alimentos se pierden antes de su consumo. La identificación del punto óptimo de maduración, tanto para la cosecha como para la venta, y su manipulación adecuada permiten reducir este desperdicio. La *Passiflora quadrangularis* (badea) es un cultivo tradicional sudamericano rico en antioxidantes y de gran importancia económica para las comunidades. Determinar el grado de madurez de la badea es fundamental para garantizar la calidad y reducir las pérdidas postcosecha. En este estudio, se realizó una caracterización fisicoquímica por días de maduración y se utilizaron imágenes de la badea en tres etapas de maduración: verde-madura, madura para la cosecha y completamente madura. La caracterización fisicoquímica sugiere un pH promedio de 5,73 y un índice de madurez de 11,62 %, lo que indica un estado de maduración temprana, adecuado para la cosecha. Las imágenes fueron analizadas mediante algoritmos multivariantes, incluidos el Análisis de Componentes Principales (ACP) y el Análisis Discriminante de Mínimos Cuadrados Parciales (PLS-DA), con el fin de identificar patrones visuales y

clasificar los niveles de madurez. El modelo alcanzó una precisión de entrenamiento del 100 % y de crossvalidación del 83 %. Estas metodologías ofrecen una manera rápida y no invasiva de evaluar la madurez de la fruta, facilitando la toma de decisiones sobre el momento adecuado para la cosecha y contribuyendo a reducir el desperdicio postcosecha.

**Palabras clave:** Índice de madurez, análisis multivariante, fruta tropical, RGB, PLS-DA.

## 1. INTRODUCTION

Fruits and vegetables are essential components of the human diet due to their richness in vitamins, minerals, fiber, and bioactive compounds that benefit health [1]. However, their perishability makes them one of the most wasted food categories globally. Approximately 45% are lost before reaching the consumer [2]. These figures reflect a significant challenge to food security, especially in developing countries, where post-harvest losses directly affect the economies of farming communities.

The badea (*Passiflora quadrangularis* L.) is a tropical fruit, its cultivation is traditional, typical of coastal regions of South America, not only has a high cultural and gastronomic value, but also constitutes an important source of income for low-income families [3]. Badea is appreciated for its content of bioactive compounds, including antioxidants. The fruit extract has been linked to sedative properties [4], characteristics that contribute to its nutritional and functional value, making it attractive for both local consumption and specialized markets.

Traditionally, fruit ripeness is determined in the field through the empirical experience of producers. This approach is typically based on visual criteria, such as color change, fruit size, aroma, and tactile characteristics such as firmness and texture. Although rapid and straightforward, these practices present limitations in objectivity and reproducibility [5], [6]. Furthermore, environmental conditions, including climatic variables and agronomic management practices, can modify the physical and chemical characteristics of fruits during their development [7]. These factors can also threaten the organoleptic quality of fruits [8]. These fruits are generally found in Spanish-speaking communities, so it is necessary to standardize the terms used to describe the different common degrees of ripeness. The state of ripeness in which the fruit is unripe (the term "green") is used. The state of ripeness in which the color and texture begin to change in climacteric fruits, usually known as physiological rip is known as "pintón" [9]. In this document, "early ripening" is used; finally, the state in which the fruit is fully ripe is named "madura." [9], [10].

The laboratory's techniques used to determine ripeness measure total soluble solids (°Brix), titratable acidity, and the ripeness index (°Brix/acidity ratio). These methods provide quantitative and objective information on the fruit's development stage, allowing for more precise classification [11]. However, it requires considerable time to execute, trained personnel capable of performing the analyses correctly, and, in many cases, the destruction of the analyzed samples. The destructive nature of these techniques can be problematic in situations where samples are valuable or scarce [12], highlighting the need for alternative methods that are rapid, noninvasive, and cost-effective. Recent advances in non-invasive technologies, such as the use of visible and near-infrared (VIS/NIR) spectroscopy, have made it possible to analyze internal characteristics of fruits, such as the sugar content and phenolic compounds, without the need to destroy the samples [13].

Digital image analysis has also been used to assess fruit ripeness using parameters such as color, texture, and shape, which are associated with quality. Studies have shown that these techniques, combined with statistical models, can rapidly and nondestructively predict ripeness indices in products such as mangoes and tomatoes [14], [15].

Data from non-invasive devices have been combined with multivariate statistical analysis, which has proven to be a powerful tool for identifying patterns and classifying agricultural

products based on specific attributes [16]. Methods such as Principal Component Analysis (PCA) and Partial Least Squares Discriminant Analysis (PLS-DA) have been successfully applied in the study of tropical fruits such as mangoes [17], limes [18] papayas [19], and bananas [20], demonstrating its ability to analyze complex data and provide relevant information for decision-making in the supply chain [21].

In this study, digital images were analyzed with PCA and PLS-DA to discriminate three badea ripeness categories—green-ripe, harvest-ripe, and ripe. The results suggest that these noninvasive techniques can be implemented as a practical tool for producers, enabling timely decisions during harvest. This approach not only benefits consumers by ensuring better-quality fruits, but also has a positive impact on the economic sustainability of producing families and on reducing food waste, thus contributing to the Sustainable Development Goals (SDGs), particularly those related to zero hunger, sustainable production, and reducing food losses and waste.

Thus, this work seeks to contribute to the knowledge and development of applicable tools in the post-harvest handling of tropical fruits, emphasizing badea, highlighting the importance of technology and innovation in sustainable agriculture.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1 Fruit sampling

Trees with green fruit close to ripening were selected by simple random sampling from farms in the San Isidro area of the El Empalme canton, Guayas province. Images of these fruits were taken on the tree. Five samples were harvested on days 0, 1, 3, and 4, while three samples were collected on days 7, 8, 9, and 10. Fruits with no external damage from pests or physical harm, of approximately the same size, were selected and brought to laboratory conditions. A total of 30 fruits were harvested. The methodology adopted was proposed by [22].

### 2.2 Fruit physicochemical characterization-maturity index

The whole fruit was cleaned with potable water, and the size, weight, percentage of edible portion, and moisture content were measured.

#### 2.2.1 Length and edible portion

The length and circumference were measured using a tape measure, following the guidelines of [23]. Fruit weight was obtained using a CAMRY brand digital scale with a 5 kg capacity.

The percentage of edible portion was determined by weighing the fruit before and after peeling. The edible percentage was calculated using the Equation 1:

$$\% \text{ Edible portion} = \frac{\text{final weight}}{\text{initial weight}} * 100 \quad (1)$$

#### 2.2.2 Moisture

A Merment brand sterilizing oven was used to determine moisture content. A crucible was weighed, then 5g of the sample (wet sample) was placed in the oven for 2 hours at 105°C (dry sample), and finally weighed.

The fruit's moisture percentage was determined using the Equation 2:

$$\% \text{ Moisture} = \frac{\text{Wet sample weight} - \text{Dry sample weight}}{\text{Wet sample weight}} * 100 \quad (2)$$

### 2.2.3 pH and acidity analysis

After the physical analyses were performed, before the chemical analyses, the pulp was extracted using a fruit extractor (UMCO, 6101 model, 1 L), filtered, and 50 mL of the juice was centrifuged at 3.400 rpm for 3 minutes. The soluble solids content (°Brix) was determined using a digital refractometer (Atago Master) and the pH was determined using a pH meter (Starter Bio).

For acidity, 50 ml of the supernatant was taken. It was determined according to [24]. Calculations were made based on the citric acid content. The equation 3 was used:

$$\% \text{ Acidity} = \frac{N * V * 0.67(\text{meq. ac})}{ml} * 100 \quad (3)$$

Where:

N: NaOH Normality

V: Titration flow rate (ml)

Meq.ac: milliequivalent of citric acid: (0,67)

Sample (ml): Total ml of the sample used.

### 2.2.4 Maturity index

The initial ripeness of the fruit was determined using the equation 4 [25]:

$$\text{Maturity Index (MI\%)} = \frac{\text{Soluble solids content}}{\text{Titratable acidity}} * 100 \quad (4)$$

All analyses were done in triplicate during days 0, 1, 3, 4, 7, 8, 9 and 10 days in which 3 experimental units were analyzed.

### 2.3 Image analysis

Whole fruits were analysed, and the images were captured using a Samsung Galaxy A20 smartphone with a 13 MP f/1,9 + 5 MP f/2,2 rear camera, in JPG format. Image capture distances were standardized at 1 m in the field and 15 cm in the laboratory.

### 2.4 Statistical analysis

The determination of statistical differences between the days of analysis in the physicochemical variables was carried out using an ANOVA analysis of variance, in Statgraphics Centurion.

The images were analyzed using MATLAB V2018a software, and the PLS-DA was applied to the red (R), green (G), and blue (B) color coordinates. The dependent variable corresponds to maturity, with the classes: green (1), early-ripe (2), and ripe (3). Categories were derived from the maturity index outcomes; measurement procedures are detailed in Section 2.4.

## 3. RESULTS

### 3.1 Physicochemical characteristics of the badea

Table 1 presents the data corresponding to the weight, length and diameter of the badea. It is observed that, as the days go by, the weight increases progressively, reaching to a total of 2,51 kg. The length of the fruit also increased, going from 25,50 cm on day 1 to 27,67 cm on day 10, also the diameter varies slightly from 13,69 to 14,92. The statistical analysis indicates that the variables length and diameter show no significant differences.

**Table 1.** Means and standard deviation of physical variables.

Maturity state	Day	Weight (Kg)		Length (cm)		Diameter (cm)	
		X	$\sigma$	X	$\sigma$	X	$\sigma$
GREEN	0	2,12	± 0,0935	25,50	± 3,000	13,69	± 1,49
	1	2,15	± 0,0944	27,75	± 0,957	12,89	± 0,32
EARLY RIPE	3	2,15	± 0,0944	28,75	± 1,708	15,72	± 0,57
	4	2,20	± 0,0586	26,00	± 2,828	15,41	± 0,92
	7	2,31	± 0,1228	26,50	± 1,291	15,08	± 0,60
RIPE	8	2,43	± 0,1080	27,00	± 0,816	16,43	± 0,60
	9	2,45	± 0,1200	27,33	± 1,528	15,60	± 1,20
	10	2,51	± 0,1142	27,67	± 1,528	14,92	± 0,18

Table 2 presents the results of the chemical measurements. Statistically significant differences are observed in the °Brix values; starting on day 4, a notable increase is detected.

Acidity showed statistically significant differences; the highest acidity value was observed in the green fruit, which progressively decreased over the days. Unlike the variations observed in pH and °Brix, acidity experienced a continuous decrease from day 1 to day 10.

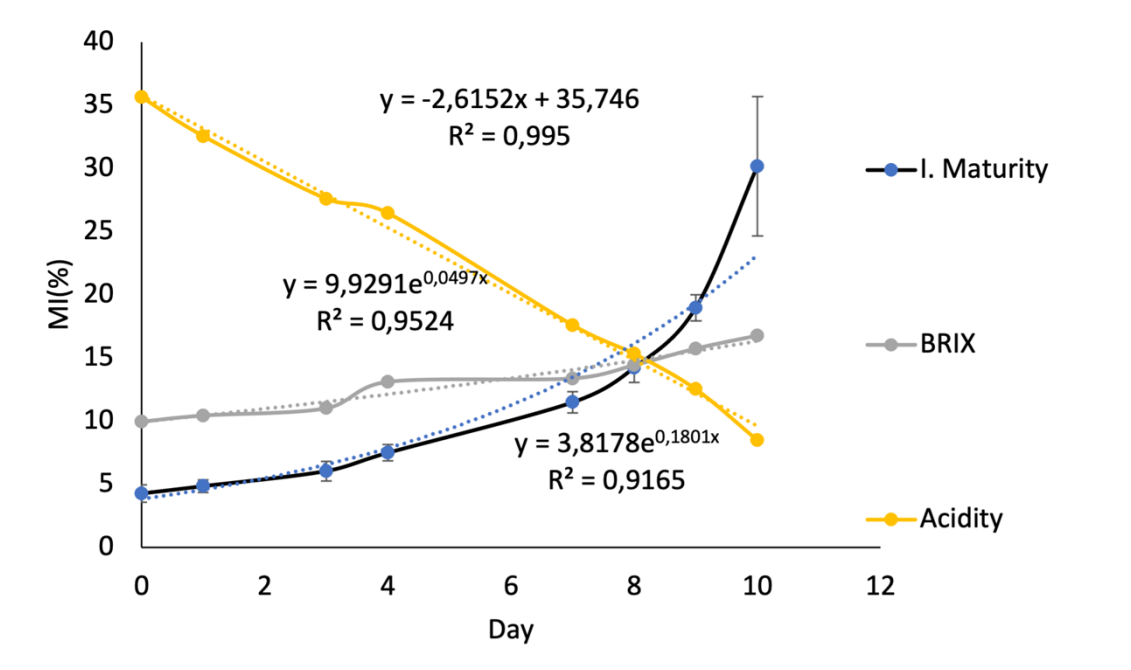
**Table 2.** Means and standard deviation of chemical variables.

State	Day	pH		°Brix		Acidity (%)		IM (%)	
		X	$\sigma$	X	$\sigma$	X	$\sigma$	X	$\sigma$
GREEN	0	5,58	± 0,06 <sup>a</sup>	4,33	± 0,39 <sup>a</sup>	0,737	± 0,042 <sup>a</sup>	5,94	± 0,7022 <sup>a</sup>
	1	5,54	± 0,05 <sup>a</sup>	4,54	± 0,33 <sup>a</sup>	0,673	± 0,021 <sup>b</sup>	6,75	± 0,4952 <sup>a</sup>
EARLY-RIPE	3	5,67	± 0,03 <sup>b</sup>	4,79	± 0,33 <sup>b</sup>	0,571	± 0,024 <sup>c</sup>	8,42	± 0,7696 <sup>b</sup>
	4	5,71	± 0,04 <sup>c</sup>	5,70	± 0,25 <sup>c</sup>	0,547	± 0,018 <sup>d</sup>	10,43	± 0,6513 <sup>c</sup>
	7	5,83	± 0,03 <sup>d</sup>	5,82	± 0,24 <sup>c</sup>	0,364	± 0,018 <sup>e</sup>	16,00	± 0,8341 <sup>d</sup>
RIPE	8	6,03	± 0,06 <sup>e</sup>	6,28	± 0,25 <sup>d</sup>	0,317	± 0,014 <sup>f</sup>	19,82	± 1,1586 <sup>e</sup>
	9	6,16	± 0,06 <sup>f</sup>	6,84	± 0,21 <sup>e</sup>	0,259	± 0,007 <sup>g</sup>	26,43	± 1,0295 <sup>e</sup>
	10	6,31	± 0,04 <sup>g</sup>	7,29	± 0,21 <sup>f</sup>	0,176	± 0,022 <sup>h</sup>	42,07	± 5,5139 <sup>g</sup>

IM: Maturity Index;  $\sigma$ : standard deviation, <sup>a</sup> letters that represent differences in significance.



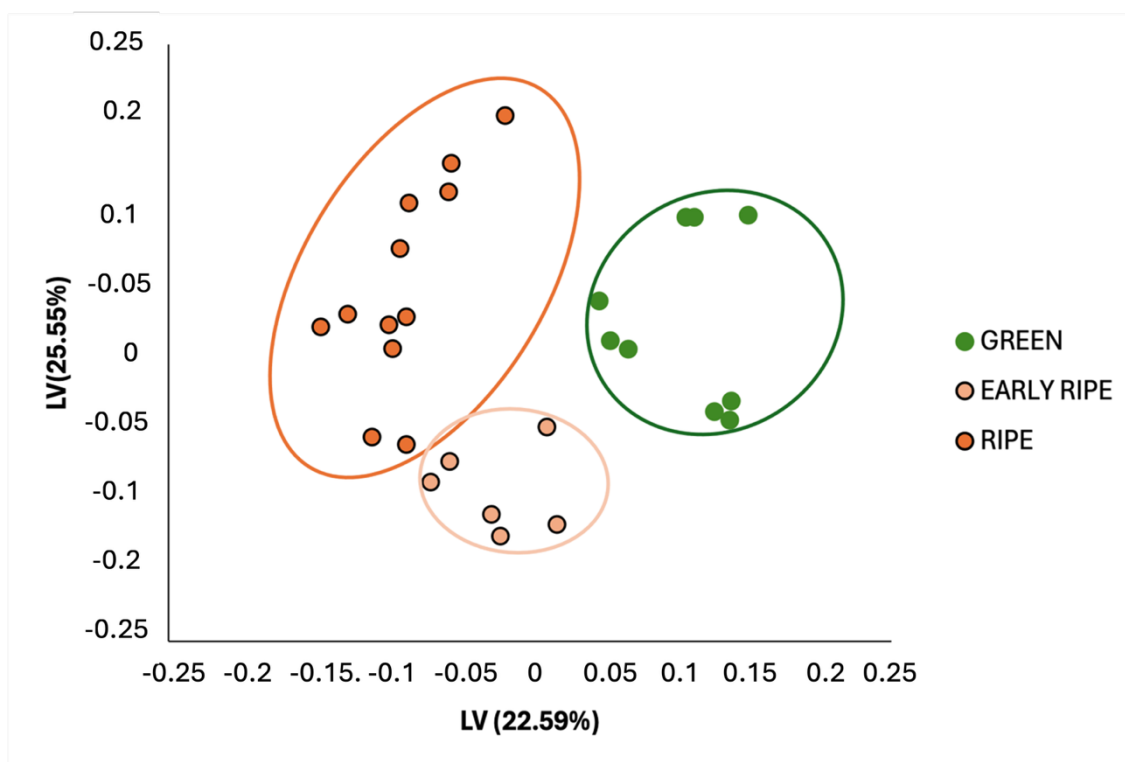
The fruit maturity index (MI %) ranges from 5,94 (green) to 42,07 (ripe) on day 10, corresponding to an increase in soluble solids and a decrease in acidity. A high standard deviation is observed on day 10, indicating that the content of soluble solids and acidity, as well as the variability between samples, increases. The exponential trend in the maturity index from day 4, as shown in Figure 1, indicates that ripening does not follow a linear pattern but accelerates over time, especially after physiological changes, which may be relevant for defining the optimal time for harvesting or consumption.



**Figure 1:** Variation of the badea maturity index vs. harvest days.

### 3.2 Fruit ripeness classification by image analysis

Figure 2 shows the biplot of the PLS-DA analysis, which displays the dispersion of the RGB data for the samples in the space defined by two latent variables (LVs). These variables represent linear combinations of the original data that maximize discrimination between predefined groups (fruit maturity states). The first LV explains 22,59% of the variability in the data, and the second LV explains 25,55% of the variability. The groupings between the samples indicate how the variability of the first LV is due to patterns found in green, early-ripe and ripe fruits. It is observed that in LV 1 the green fruits are in the space with positive values, while the ripe fruits obtain negative values. In the case of the early-ripe fruits, they are in the negative space of LV2, while the dispersion of the ripe samples, some also obtain positive values in this LV, which would allow discriminating between these 2 categories (early-ripe and ripe). Finally, the spread observed in the ripe data likewise indicates higher internal variability, likely due to variation in the final degree of maturity among samples within the group.



**Figure 2.** Scatter plot - classification by degree of ripeness of green, ripe, and ripe fruit.

Among the statistical parameters of the PLS-DA model is accuracy, which was 100% overall, indicating that all samples were correctly classified into their respective categories during model adjustment. After cross-validation, the model's total accuracy was 83%. Individually, the accuracy for unripe fruits was 83%, indicating that most samples were correctly classified, although 17% were misclassified. In the early-ripe phase, the accuracy was lower at 75%, suggesting that this category is the most difficult for the model to classify correctly, possibly due to fewer distinctive features or greater internal variability. Accuracy for ripe fruits was highest after training at 90%, indicating that the model classifies this category well.

#### 4. DISCUSSION

In this study, consistent patterns were identified in the physicochemical and image data, allowing for the classification into three maturity categories: green, early-ripe, and ripe. The similarity of the categories with those studied according to reference [26] reinforces the validity of the method used, demonstrating that physicochemical analyses such as image-based techniques are reliable and complementary tools to determine the state of maturity of the fruit.

The physicochemical results obtained in this study fall within the ranges reported by [20], who indicated that the length of the badea ranges from 12 to 25 cm, with its diameter ranging from 8 to 16 cm across the three maturity stages studied (green, early-ripe, and ripe) [21]. This finding aligns with observations by other authors who also found no significant variation in fruit length and diameter between ripening stages, but variations in internal characteristics.

The Brix values obtained in this study are consistent with those reported by [27], who found a value of 4.78 °Brix in the pulp. However, [28] found that total solids values reached a maximum of 6° Brix, reflecting a slight difference in cultivation conditions or fruit variety. This variability is also reflected in the range of soluble solids observed, which is within the interval reported by [29], with values of 5.83 and 6.23 °Brix for fruits grown under organic and conventional practices, respectively.

Regarding acidity, the results obtained are in line with those reported by [26], who reported an acidity range of 0,36% to 0,49% in the badea pulp. This range suggests that acidity does not vary significantly between ripeness stages but may be a key indicator of the fruit's organoleptic quality.

The variation in the maturity index (MI) is consistent with the trend observed by [30], who reported similar behavior in strawberry ripening studies. Additionally, the exponential behavior observed in Figure 1 is comparable to the findings of [31], who explained that in climacteric fruits, the MI increases sharply after the peak respiration rate is reached, leading to rapid degradation of organic acids and accelerated fruit deterioration.

Regarding classification with PLS-DA, the results obtained are comparable to those reported by [30] for models calibrated with smartphone algorithms, which achieved an average accuracy of 91,98%, with validation accuracies ranging from 86% to 93%. Similarly, our results align with those obtained by [31] in the classification of granadillas, where a total accuracy of 93% was reported, with 96,6% accuracy for ripe granadillas and 86,6% for 'green-purple' passion fruits. Furthermore, [32] reported an accuracy of 91,52% for passion fruit classification using depth imaging. These results reinforce the robustness and reliability of the model proposed in this study, as they are within a comparable range of predictive performance reported in similar studies.

## 5. CONCLUSIONS

The physicochemical characteristics of *Passiflora quadrangularis L.* harvested close to ripeness were determined. The fruit showed significant variations in weight, which increased notably, but no significant variations in length and diameter, with average values of 2,29 kg, 27 cm in length, and 14,96 cm in diameter. The chemical parameters found were consistent with previous studies, and the average values of the early-ripe stage, suggested as optimal for harvest, were: pH 5,7, Brix 5,6, acidity 0,49%, and a maturity index of 11,62%. The image analysis results indicate that RGB coordinates can be used to fit models based on multivariate algorithms, such as PLS-DA classification. This allowed for the identification of patterns for classifying badea fruit into green, early-ripe, and ripe with 100% accuracy. The results can be used as an intuitive tool for production, leading to a reduction in post-harvest fruit losses. Reducing post-harvest waste contributes to sustainable development goals, such as zero hunger and poverty reduction.

## REFERENCES

- [1] D. Aune *et al.*, "Fruit and vegetable intake and the risk of cardiovascular disease, total cancer and all-cause mortality-a systematic review and dose-response meta-analysis of prospective studies", *International Journal of Epidemiology*, vol. 46, no.3, pp. 1029–1056, Jun. 2017. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1093/ije/dyw319>
- [2] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), FAO, El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2019: Pérdidas y desperdicio de alimentos en el contexto de sistemas alimentarios sostenibles. 2019. Accessed: Dec. 31, 2024. [Online]. Available: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/2120f787-5a49-41f5-a9fb-f4ceaac98b2c/content>
- [3] M. V. Pardo Solórzano, G. M. Costa, and L. Castellanos, "Passiflora By-Products: Chemical Profile and Potential Use as Cosmetic Ingredients," *Sci Pharm*, vol. 92, no. 4, pp. 57, Oct. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/scipharm92040057>

- [4] A. C. Gazola *et al.*, “The sedative activity of flavonoids from *Passiflora quadrangularis* is mediated through the GABAergic pathway,” *Biomedicine & Pharmacotherapy*, vol. 100, pp. 388–393, Apr. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2018.02.002>
- [5] N. Aghilinategh, M. J. Dalvand, and A. Anvar, “Detection of ripeness grades of berries using an electronic nose,” *Food Sci Nutr*, vol. 8, no. 9, pp. 4919–4928, Sep. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/fsn3.1788>
- [6] M. Manzoor, S. B. Hussain, M. A. Anjum, M. Naseer, R. Ahmad, and V. Ziogas, “Effects of Harvest Time on the Fruit Quality of Kinnow and Feutrell’s Early Mandarins (*Citrus reticulata* Blanco),” *Agronomy*, vol. 13, no. 3, pp. 802, Mar. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/agronomy13030802>
- [7] V. Prasanna, T. N. Prabha, and R. N. Tharanathan, “Fruit Ripening Phenomena—An Overview,” *Crit Rev Food Sci Nutr*, vol. 47, no. 1, pp. 1–19, Jan. 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/10408390600976841>
- [8] L. Ortenzi *et al.*, “A Machine Vision Rapid Method to Determine the Ripeness Degree of Olive Lots,” *Sensors*, vol. 21, no. 9, pp. 2940, Apr. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s21092940>
- [9] V. Paul, R. Pandey, and G. C. Srivastava, “The fading distinctions between classical patterns of ripening in climacteric and non-climacteric fruit and the ubiquity of ethylene—An overview,” *J Food Sc. Technol*, vol. 49, no. 1, pp. 1–21, Feb. 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0293-4>
- [10] A. Payasi, and G. G. Sanwal, “Ripening of climacteric fruits and their control,” *J Food Biochem*, vol. 34, no. 4, pp. 679–710, Aug. 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2009.00307.x>
- [11] K. Simkova *et al.*, “Non-destructive and destructive physical measurements as indicators of sugar and organic acid contents in strawberry fruit during ripening,” *Sci Hort*, vol. 327, pp. 112843, Mar. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.112843>
- [12] M. A. Quelal-Vásquez, M. J. Lerma-García, É. Pérez-Esteve, P. Talens, and J. M. Barat, “Roadmap of cocoa quality and authenticity control in the industry: A review of conventional and alternative methods,” *Compr Rev Food Sci Food Saf*, vol. 19, no. 2, pp. 448–478, Mar. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12522>
- [13] M. A. Quelal-Vásquez, M. J. Lerma-García, É. Pérez-Esteve, A. Arnau-Bonachera, J. M. Barat, and P. Talens, “Changes in methylxanthines and flavanols during cocoa powder processing and their quantification by near-infrared spectroscopy,” *Lwt*, vol. 117, pp. 108598, Jan. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108598>
- [14] S. Cubero, N. Aleixos, E. Moltó, J. Gómez-Sanchis, and J. Blasco, “Advances in Machine Vision Applications for Automatic Inspection and Quality Evaluation of Fruits and Vegetables,” *Food Bioproc Tech*, vol. 4, no. 4, pp. 487–504, May. 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0411-8>
- [15] E. Saldaña, R. Siche, M. Luján, and R. Quevedo, “Review: computer vision applied to the inspection and quality control of fruits and vegetables,” *Brazilian Journal of Food Technology*, vol. 16, no. 4, pp. 254–272, Dec. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1590/S1981-67232013005000031>

- [16] K. Ncama, L. S. Magwaza, A. Mditshwa, and S. Z. Tesfay, "Application of Visible to Near-Infrared Spectroscopy for Non-Destructive Assessment of Quality Parameters of Fruit," in *Infrared Spectroscopy - Principles, Advances, and Applications*, IntechOpen, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5772/intechopen.80069>
- [17] S. N. Jha, and S. Gunasekaran, "Authentication of sweetness of mango juice using Fourier transform infrared-attenuated total reflection spectroscopy," *J Food Eng*, vol. 101, no. 3, pp. 337–342, Dec. 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.07.019>
- [18] S. Teerachaichayut, and H. T. Ho, "Non-destructive prediction of total soluble solids, titratable acidity and maturity index of limes by near infrared hyperspectral imaging," *Postharvest Biol Technol*, vol. 133, pp. 20–25, Nov. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.07.005>
- [19] A. A. Bhosale, and K. K. Sundaram, "Nondestructive Method for Ripening Prediction of Papaya," *Procedia Technology*, vol. 19, pp. 623–630, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.protecy.2015.02.088>
- [20] P. P. Subedi, and K. B. Walsh, "Non-invasive techniques for measurement of fresh fruit firmness," *Postharvest Biol Technol*, vol. 51, no. 3, pp. 297–304, Mar. 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.03.004>
- [21] Anjali *et al.*, "State-of-the-art non-destructive approaches for maturity index determination in fruits and vegetables: principles, applications, and future directions," *Food Production, Processing and Nutrition*, vol. 6, no. 1, pp. 56, Feb. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s43014-023-00205-5>
- [22] G. Vuksani, A. Vuksani, O. Kyçyk, F. Pazari, and T. Thomaj, "Determination of Olive Maturity Stage and Optimal Harvest Interval of 'Kalinjot' Cultivar Using Destructive and Non-Destructive Methods," *AgriEngineering*, vol. 7, no. 8, pp. 253, Aug. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/Agriengineering7080253>
- [23] C. Neupane, M. Pereira, A. Koirala, and K. B. Walsh, "Fruit Sizing in Orchard: A Review from Caliper to Machine Vision with Deep Learning," *Sensors*, vol. 23, no. 8, pp. 3868, Apr. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s23083868>
- [24] AOAC, "AOAC Official Method 942.15 Acidity (Titratable) of Fruit Products," in *Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL*, New York: Oxford University Press, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1093/9780197610145.003.3390>
- [25] D. Kimball, "The Brix/Acid Ratio," in *Citrus Processing*, Dordrecht: Springer Netherlands, 1991, pp. 55–65. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1007/978-94-011-3700-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-011-3700-3_4)
- [26] M. E. Arena, I. S. Povilonis, V. Borroni, D. Constenla, and S. Radice, "Changes in physicochemical properties at different development stages of *Hexachlamys edulis* fruit, an underutilized South American species," *Heliyon*, vol. 7, no. 11, pp. e08323. Nov. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08323>
- [27] S. D. Ramaiya, H. A. Ismail, N. Khairuddin, and M. A. Awang, "Ripening Characterization, Fruit Quality and Sensory Attributes of *Passiflora quarangularis* L.," *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*, vol. 24, no. 6, pp. 925-936, 2023. [Online]. Available: <https://www.iscientific.org/wp-content/uploads/2024/01/106-ijcbs-23-24-6-106.pdf>

- [28] J. M. Sánchez Soto, L. H. Ramos, and E. J. Torres Mendoza, “Efectos fisiológicos de badea (*Passiflora quadrangularis*) y yuca (*Manihot esculenta*) utilizando recubrimientos a base de cera y parafina bajo conservación en frío,” *Revista colombiana de investigaciones agroindustriales*, vol. 1, no. 1, pp. 33–43, Dec. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.23850/24220582.113>
- [29] S. D. Ramaiya, H. H. Lee, Y. J. Xiao, N. S. Shahbani, M. H. Zakaria, and J. S. Bujang, “Organic cultivation practices enhanced antioxidant activities and secondary metabolites in giant granadilla (*Passiflora quadrangularis* L.),” *PLoS One*, vol. 16, no. 7, Jul. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255059>
- [30] Simkova, K., Veberic, R., Hudina, M., Grohar, M. C., Pelacci, M., Smrke, T., Ivancic, T., Cvelbar Weber, N., and Jakopic, J. (2024b). Non-destructive and destructive physical measurements as indicators of sugar and organic acid contents in strawberry fruit during ripening. *Scientia Horticulturae*, vol. 327, Mar. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.112843>
- [31] D. Escobar Figueroa, and E. Roa Guerrero, “Sistema de visión artificial para la identificación del estado de madurez de frutas (granadilla),” *Redes de Ingeniería*, vol. 7, no. 1, pp. 78, Jun. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.redes.2016.1.a08>
- [32] S. Tu, Y. Xue, C. Zheng, Y. Qi, H. Wan, and L. Mao, “Detection of passion fruits and maturity classification using Red-Green-Blue Depth images,” *Biosyst Eng*, vol. 175, pp. 156–167, Nov. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/J.Biosystemseng.2018.09.004>

Copyright (2026) © Luis Egas, Gina Guapi, Maribel Quelal-Vásquez.

Este texto está protegido bajo una licencia internacional [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/). Usted es libre para compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato. También podrá adaptar: remezclar, transformar y construir sobre el material. [Ver resumen de la licencia.](#)





# Camino al hidrógeno verde solar: revisión literaria de tecnologías, eficiencia y viabilidad económica

## *(Pathway to Solar Green Hydrogen: A Literature Review of Technologies, Efficiency, and Economic Feasibility)*

Galo Padrón-Andrade, Estefanía Pesántez-Gahuancela, Danny Ochoa-Correa  
Universidad de Cuenca, Ecuador  
[galo.padron2805@ucuenca.edu.ec](mailto:galo.padron2805@ucuenca.edu.ec), [estefania.pesantez@ucuenca.edu.ec](mailto:estefania.pesantez@ucuenca.edu.ec),  
[danny.ochoac@ucuenca.edu.ec](mailto:danny.ochoac@ucuenca.edu.ec)

**Resumen:** El hidrógeno verde generado a partir de energía solar se perfila como una alternativa técnica para transitar hacia un modelo energético sostenible. Este artículo presenta una revisión de literatura actualizada sobre los avances más relevantes en tecnologías de electrólisis alimentadas por energía solar, con un enfoque en su eficiencia, costos y viabilidad comercial. Se examinan los principales tipos de electrolizadores, sus condiciones operativas y limitaciones. El análisis incorpora aspectos económicos clave que influyen en la competitividad del hidrógeno verde, particularmente el costo nivelado de producción (LCOH), afectado por la infraestructura de almacenamiento y el costo de la electricidad. Aunque persisten desafíos técnicos y financieros, el uso de energía solar para la generación de hidrógeno se presenta como una opción concreta para diversificar matrices energéticas y reducir las emisiones del sector energético.

**Palabras clave:** Costo nivelado de producción, electrólisis, energía solar, hidrógeno verde, paneles solares.

**Abstract:** Green hydrogen produced from solar energy is emerging as a technical option to support the transition toward a sustainable energy model. This article presents an updated literature review on the most relevant advances in solar-powered electrolysis technologies, focusing on efficiency, costs, and commercial feasibility. The main types of electrolyzers are examined, along with their operating conditions and limitations. The analysis includes key economic factors that influence the competitiveness of green hydrogen, particularly the levelized cost of hydrogen (LCOH), which is affected by storage infrastructure and electricity prices. Although technical and financial challenges remain, solar-based hydrogen production is presented as a concrete option to diversify energy portfolios and reduce emissions in the energy sector.

**Keywords:** Levelized cost of production, electrolysis, solar energy, green hydrogen, solar panels.

## 1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda global de fuentes de energía sostenibles ha incentivado el desarrollo de tecnologías innovadoras para la producción de hidrógeno verde (GH-*Green Hydrogen*), considerado una alternativa estratégica para la descarbonización de sectores clave como la industria y el transporte [1]. Su capacidad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y actuar como vector energético limpio lo posiciona como un elemento central en la transición hacia una economía baja en carbono [2]. La generación de GH mediante electrólisis del agua impulsada por fuentes renovables —especialmente la energía solar—, representa una

vía prometedora hacia la independencia energética y la diversificación de las matrices energéticas nacionales [3]. Su potencial para el almacenamiento a largo plazo, así como su compatibilidad con infraestructuras existentes —como redes de gas—, refuerzan su viabilidad como pilar de la transición energética global [2].

Actualmente, existen diversas tecnologías de electrólisis empleadas en la producción de GH, entre las cuales destacan la electrólisis alcalina (AEL-*Alkaline Electrolysis*), la electrólisis por membrana de intercambio de protones (PEM-*Proton Exchange Membrane*) y la electrólisis de óxido sólido (SOEC-*Solid Oxide Electrolyzer Cell*). Cada una de estas tecnologías presenta ventajas y limitaciones específicas en términos de eficiencia, costos y aplicaciones industriales [4]. Mientras que los electrolizadores SOEC han alcanzado eficiencias de hasta el 91 %, los sistemas PEM muestran un rendimiento cercano al 66 %, lo que subraya la importancia de seleccionar la tecnología adecuada según las condiciones operativas y las necesidades energéticas [5].

No obstante, la adopción del GH enfrenta importantes desafíos económicos. El costo nivelado del hidrógeno (LCOH, por sus siglas en inglés *Levelised Cost of Hydrogen*), indicador clave para evaluar su viabilidad comercial, oscila entre 1,19 y 12,16 \$/kg, dependiendo de factores como la combinación de fuentes energéticas y la ubicación geográfica del sistema [5]. Variables macroeconómicas como la tasa de interés, la inflación y la degradación de los componentes impactan significativamente el LCOH, pudiendo elevarlo entre un 5 % y 7 % por cada punto porcentual de incremento en la tasa de interés [6].

Uno de los retos más relevantes en el despliegue del GH es su almacenamiento seguro y eficiente, dada su baja densidad energética por unidad de volumen. Actualmente se emplean distintas estrategias, como el almacenamiento en estado gaseoso (hasta 700 bar), líquido (a -253 °C) y en materiales sólidos, como los hidruros metálicos. Aunque estos últimos ofrecen mayor densidad de almacenamiento, enfrentan barreras técnicas relacionadas con la reversibilidad y la cinética de liberación del hidrógeno [2], [7]. A estos retos se suman obstáculos estructurales, como la falta de infraestructura especializada, las limitaciones de financiamiento y las brechas tecnológicas en países en desarrollo [6].

Desde una perspectiva económica, la inversión inicial para la implementación de un sistema híbrido de producción de GH basado en energía solar fotovoltaica (PV) y eólica se sitúa entre 1.500 y 2.200 \$/kW, mientras que los costos operativos anuales representan entre el 3 % y 5 % del capital de inversión (CAPEX) [5]. La combinación de incentivos gubernamentales, economías de escala y avances en la eficiencia de los electrolizadores se perfila como una estrategia fundamental para reducir los costos de producción y acelerar la adopción global de esta tecnología.

En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo ofrecer una revisión exhaustiva y actualizada de los avances tecnológicos en la producción de GH a partir de energía solar. Se analizan las principales tecnologías disponibles, sus aplicaciones, eficiencia y costos, así como los marcos políticos y las estrategias que impulsan su desarrollo a escala internacional, con el fin de identificar las oportunidades y los desafíos asociados a una transición energética verdaderamente sostenible.

El artículo está estructurado como sigue: la sección 2 describe la metodología de selección de estudios empleada; la sección 3 presenta los resultados de la revisión, abordando las tecnologías de producción de hidrógeno verde mediante energía solar. En esta se analiza aspectos técnicos y económicos clave, incluyendo eficiencia, costos, almacenamiento y control. Se exploran políticas de apoyo, proyectos piloto y escalabilidad. La sección 4 presenta los resultados y discusión general, y, finalmente, la sección 5 expone las conclusiones y perspectivas futuras.

## 2. METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE ESTUDIOS

El creciente interés global por el GH se debe a su potencial para reducir significativamente las emisiones de carbono asociadas al uso de combustibles fósiles. Esta revisión tiene como objetivo responder a tres preguntas clave: ¿qué tecnologías se utilizan actualmente para la producción de GH a partir de energía solar?, ¿cuáles son los principales desafíos técnicos y económicos asociados a estas tecnologías? y ¿qué tan eficiente es el proceso de producción en distintos contextos?

La metodología utilizada se fundamenta en la recopilación y análisis de literatura científica relacionada con la producción de GH a partir de fuentes de energía renovable, con énfasis en la energía solar fotovoltaica. Se evaluaron tecnologías de electrólisis, su eficiencia operativa y las condiciones que influyen en su viabilidad técnica y económica.

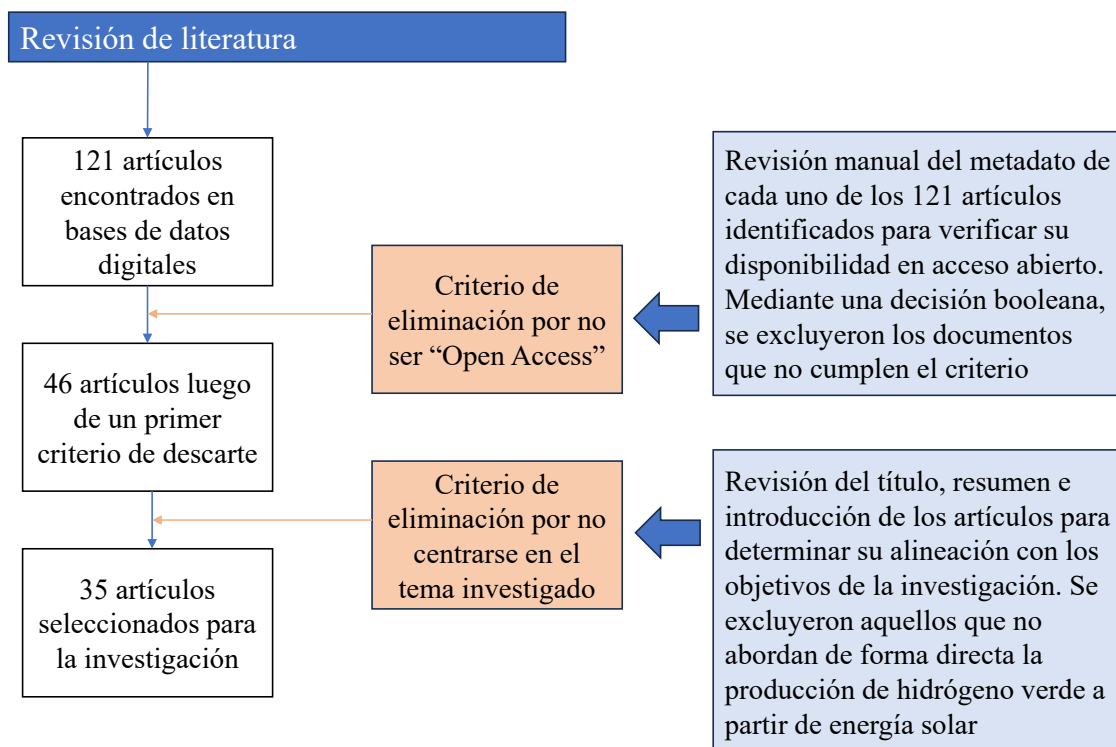
Para la revisión bibliográfica se tomaron como fuentes de consulta bases de datos digitales prestigiosas como: Scopus, Google Academic, IEEEExplore y ScienceDirect. Se utilizaron términos de búsqueda específicos en inglés, tales como: “GREEN HYDROGEN”, “PRODUCTION”, “SOLAR”, “WATER ELECTROLYZER”, “EFFICIENCY”, restringiendo el rango temporal entre 2020 y 2024. Del total de 121 resultados iniciales, se aplicó como primer filtro el criterio de acceso abierto, excluyendo aquellos artículos cuyo contenido completo requiere suscripciones institucionales. Esta decisión responde a la necesidad de asegurar que los resultados y hallazgos de esta revisión puedan ser replicados, verificados y utilizados libremente por investigadores de instituciones que no cuentan con acceso a bases de datos de pago. Si bien se reconoce que esta medida puede excluir estudios valiosos y de alta calidad, la experiencia previa ha evidenciado que existen numerosas publicaciones de acceso libre en revistas reconocidas y avaladas por editoriales académicas de prestigio. Como resultado, el conjunto se redujo a 46 artículos.

Posteriormente, se aplicó un segundo filtro basado en criterios de relevancia temática, descartando aquellos estudios que, aunque relacionados con el hidrógeno, no abordaban de forma directa su producción a partir de energía solar o no aportaban datos concretos sobre eficiencia, costos o viabilidad tecnológica. Finalmente, se incluyeron 35 artículos directamente vinculados con los objetivos planteados en esta revisión.

Además, se aplicaron de forma parcial principios del método PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), en particular para estructurar el proceso de búsqueda, selección y exclusión de artículos. La Figura 1 presenta el diagrama de flujo que resume las etapas seguidas para la selección de estudios incluidos en esta revisión. Por su parte, la Tabla 1 sintetiza la información de los artículos seleccionados, incluyendo metadatos relevantes como el resumen, los autores y el año de publicación.

## 3. RESULTADOS

Esta sección reúne y sintetiza los hallazgos más relevantes identificados en la revisión bibliográfica sobre la producción de GH a partir de energía solar. Se presentan comparaciones entre tecnologías de electrólisis, análisis de eficiencia energética, impacto ambiental según el ciclo de vida, costos económicos y tendencias actuales en almacenamiento, control e integración de sistemas. Asimismo, se discuten los desafíos técnicos y económicos que condicionan su viabilidad, así como las estrategias tecnológicas y políticas que pueden facilitar su adopción a gran escala.



**Figura 1.** Diagrama de flujo del proceso para la selección de artículos.

**Tabla 1.** Artículos seleccionados con resumen, autores y año de publicación.

Nº	Título	Autores	Resumen	Año
1	A brief overview of solar and wind-based green hydrogen production systems: Trends and standardization	M. S. Herdem, D. Mazzeo, N. Matera, C. Baglivo, N. Khan, Afnan, P. M. Congedo, M. G. De Giorgi	Revisión de sistemas de producción de hidrógeno verde con energía solar y eólica.	2024
2	A Review of the Research Progress and Application of Key Components in the Hydrogen Fuel Cell System	J. Li, T. Wu, C. Cheng, J. Li, K. Zhou	Estudio del ciclo de hidrógeno en celdas de combustible, destacando avances, desafíos y futuro desarrollo en bombas, eyectores y separadores, con enfoque en su aplicación en vehículos y almacenamiento de energía.	2024
3	A review of water electrolysis for green hydrogen generation considering PV /wind/ hybrid/ hydropower/ geothermal/ tidal and wave/ biogas energy systems, economic analysis, and its application	M. Awad, A. Said, M. H. Saad, A. Farouk, M. M. Mahmoud, M. S. Alshammari, M. L. Alghaythi, S. Aleem, A. Abdelaziz, A. Omar	Análisis de la generación de hidrógeno verde con fuentes renovables, destacando electrolizadores, eficiencia, costos, desafíos e innovaciones, diferenciándolos por su impacto ambiental.	2023

---

4	Effect of voltage elevation on cost and energy efficiency of power electronics in water electrolyzers	G. Hysa, V. Ruuskanen, A. Kosonen, M. Niemelä, L. Aarniovuori, D. Guibert, J. Ahola	Evaluación del impacto de operar electrolizadores industriales a voltajes elevados, comparando tres topologías de rectificadores en eficiencia y costo mediante simulaciones.	2023
5	Efficient green hydrogen production through metal-organic framework-derived Ni and Co mediated iron selenide hexagonal nanorods and wireless coupled with photovoltaics for urea and alkaline water electrolysis	M. M. Meshesha, D. Chanda, B. L. Yang	Presentación de un electrocatalizador basado en estructuras MOF, NiCoFeSe, eficiente en HER, OER y UOR, logrando 11.1% de eficiencia solar-hidrógeno y 69.67% en un electrolizador con 47.85 kWh/kg de hidrógeno.	2023
6	Engineering the catalyst interface enables high carbon efficiency in both cation-exchange and bipolar membrane electrolyzers	H. Wu, B. A. Karamoko, W. Wang, J. Liu, E. Petit, S. Li, C. Salameh, D. Voiry	El estudio introduce un hidrogel en electrodos Ag para evitar (bi)carbonatos, logrando 77% de uso de carbono y 37% de eficiencia energética.	2024
7	Enhancing the Efficiency of Multi-Electrolyzer Clusters with Lye Mixer: Topology Design and Control Strategy	M. Chen, J. Jia, B. Zhang, L. Han, M. Ji, Z. Yu, D. Li, W. Wang, H. Jia, H. Xu	Sistema de producción de hidrógeno eficiente, que usa electrolizadores múltiples conectados a un mezclador de lejía, optimizando el uso de calor y reduciendo el consumo energético para integrar mejor las energías renovables.	2024
8	Essentials of hydrogen storage and power systems for green shipping	S. Brouzas, M. Zadeh, B. Lagemann	Propuesta de un marco para sistemas de hidrógeno en barcos, destacando la necesidad de pilas de combustible duraderas y la insuficiencia de la densidad energética volumétrica para el almacenamiento. También identifica lagunas regulatorias en seguridad y materiales.	2024
9	Estimating the efficiency of a PEM electrolyzer fed by a PV plant in NEOM City	A. Boretti	Análisis de una celda PEM de 100 MW en la microred de NEOM, enfocándose en su eficiencia y la variabilidad solar en la producción de hidrógeno, destacando la necesidad de electrolizadores adecuados y almacenamiento a corto plazo para estabilizar el suministro.	2024

---

---

10	Feasibility Study and Economic Analysis of PV/Wind-Powered Hydrogen Production Plant	K. Sayed, M. Khamies, A. G. Abokhalil, M. Aref, M. A. Mossa, M. M. Almalki, T. A. H. Alghamdi	Propuesta de una planta de energía verde en Sohag, Egipto, que usa hidrógeno, energía solar y eólica para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. La planta almacena energía renovable excedente y utiliza electrólisis con tecnología PEM para producir hidrógeno verde.	2024
11	Green and sol-gel synthesis of perovskite type LaCo <sub>0.2</sub> Mn <sub>0.8</sub> O <sub>3</sub> nanoceramics as potential materials for electrochemical hydrogen storage: A comparative study	A. Eslami, S. A. Lachini, M. Enhessari	Presenta la síntesis de nanocerámicas de tipo LaCo <sub>0.2</sub> Mn <sub>0.8</sub> O <sub>3</sub> para almacenamiento de hidrógeno, destacando que el método sol-gel ofrece mayor capacidad de almacenamiento y descarga que el método verde.	2024
12	Green hydrogen production using bifacial solar photovoltaics integrated with high-albedo roof coating & micro-inverter	F. F. Ahmad, O. Rejeb, G. Boudekji, C. Ghenai	El estudio demuestra que integrar un sistema fotovoltaico bifacial con techos fríos aumenta la producción de energía en un 33.02%, lo que mejora significativamente la producción de hidrógeno verde (30.26 g de H <sub>2</sub> frente a 22.75 g con PV convencional).	2024
13	Hydrogen energy storage integrated hybrid renewable energy systems: A review analysis for future research directions	A. Z. Arsad, M. A. Hannan, A. Q. Al-Shetwi, M. Mansur, K. M. Muttaqi, Z. Y. Dong	Análisis de sistemas de almacenamiento de hidrógeno y su integración con energías renovables, destacando su crecimiento desde 2016.	2022
14	Hydrogen Energy Storage System: Review on Recent Progress	M. Wong, H. N. Afrouzi	Revisión de investigaciones sobre sistemas de almacenamiento de energía de hidrógeno (HESS), destacando su uso para generación eléctrica y balanceo de demanda.	2024
15	Hydrogen Production Using Solar Energy	A. Abdurakhmanov, Y. Sabirov, S. Makhmudov, D. Pulatova, T. Jamolov, N. Narshieva, S. Ochilov	Propuesta para producir hidrógeno verde mediante electrólisis con una estación solar de 10 kW.	2021

---



---

16	Hydrogen production by water electrolysis and offgrid solar PV	F. Gutiérrez-Martín, L. Amodio, M. Pagano	Este estudio presenta una metodología para diseñar sistemas híbridos PV-H2 considerando datos climáticos y variables eléctricas para optimizar energía, capacidad y costos.	2020
17	Ignore variability, overestimate hydrogen production – Quantifying the effects of electrolyzer efficiency curves on hydrogen production from renewable energy sources	D. Virah-Sawmy, F. J. Beck, B. Stumberg	Análisis del impacto de considerar la eficiencia variable de los electrolizadores en la producción de hidrógeno verde a partir de energías renovables.	2024
18	In-house green hydrogen production for steelmaking decarbonization using steel lag as thermal energy storage material	A. Taji Eshkaftaki, E. Baniasadi, A. M. Parvanian, y A. Amiri	Aplicaciones del hidrógeno verde en la industria	2024
19	Innovative hybrid energy storage systems with sustainable integration of green hydrogen and energy management solutions for standalone PV microgrids based on reduced fractional gradient descent algorithm	R. A. Younis, E. Touti, M. Aoudia, W. Zahrouni, A. I. Omar, y A. H. Elmetwaly	Sistemas de almacenamiento de hidrógeno proveniente de fuentes renovables híbridas.	2024
20	Insights into the structure-property relationships of activated carbon derived from phenolic resin for electrochemical storage of green hydrogen using proton battery	R. Ojha	Almacenamiento de hidrógeno verde y revisión de emisiones de carbono.	2025
21	Integration of underground green hydrogen storage in hybrid energy generation	Z. Saadat, M. Farazmand, y M. Sameti	Hidrógeno verde y almacenamiento del mismo.	2024
22	Key challenges and recent progress in batteries, fuel cells, and hydrogen storage for clean energy systems	S. G. Chalk y J. F. Miller	Retos en la producción de hidrógeno y características del sistema.	2006

---

---

23	Mathematical modeling of an integrated photovoltaic-assisted PEM water electrolyzer system for hydrogen production	B. Hüner	Modelado matemático de un electrolizador para producción de hidrógeno.	2024
24	Off-grid solar PV–wind power–battery–water electrolyzer plant: Simultaneous optimization of component capacities and system control	A. Ibáñez-Rioja	Sistemas off-grid que integran generación solar y eólica.	2023
25	One year operation of an anion exchange membrane water electrolyzer utilizing Aemion+® membrane: Minimal degradation, low H <sub>2</sub> crossover and high efficiency	M. Moreno-González	Estudio de operación de un electrolizador de membrana de intercambio aniónico.	2023
26	Optimal planning of renewable energy park for green hydrogen production using detailed cost and efficiency curves of PEM electrolyzer	Y. Astriani, W. Tushar, y M. Nadarajah	Planificación de parques de fuentes renovables para la producción de hidrógeno.	2024
27	Optimizing temperature and pressure in PEM electrolyzers: A model-based approach to enhanced efficiency in integrated energy systems	L. Bornemann, J. Lange, y M. Kaltschmitt	Estudio de la optimización de temperatura en los electrolizadores PEM.	2025
28	Performance evaluation of PV panels/wind turbines hybrid system for green hydrogen generation and storage: Energy, exergy, economic, and enviroeconomic	M. Nasser, T. F. Megahed, S. Ookawara, y H. Hassan	Evaluación del rendimiento de un sistema híbrido de generación solar y eólica.	2022
29	Production of Green Hydrogen through Renewable Energy Sources based Microgrid	A. Sony, K. Acharjya, K. Sharma, y N. Beemkumar	Producción de hidrógeno mediante energías renovables.	2024

---

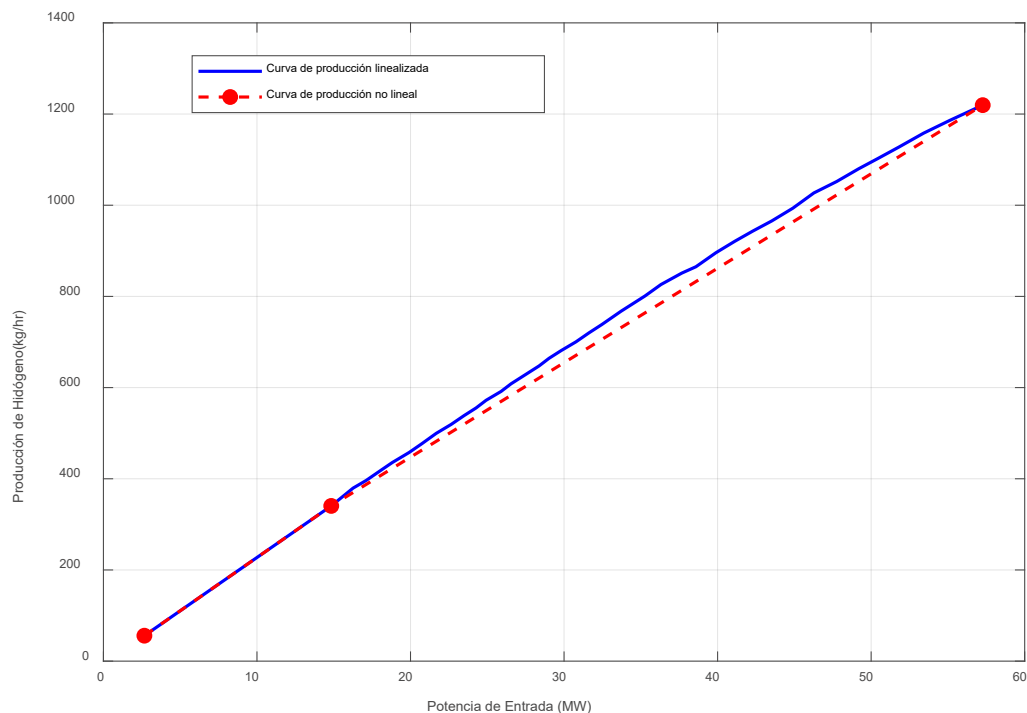
---

30	The development of an assessment framework to determine the technical hydrogen production potential from wind and solar energy	A. Okunlola, M. Davis, y A. Kumar	Aspectos técnicos de la producción de hidrógeno.	2022
31	Review—Engineering Challenges in Green Hydrogen Production Systems	M. Tao, J. A. Azzolini, E. B. Stechel, K. E. Ayers, y T. I. Valdez	Desafíos en la producción de hidrógeno verde.	2022
32	Simulation methodology for an off-grid solar–battery–water electrolyzer plant: Simultaneous optimization of component capacities and system control	A. Ibáñez-Rioja	Simulación de un Sistema off-grid para evaluación del rendimiento del sistema.	2022
33	Strategies for simultaneous improvement of reaction rate and caustic efficiency of brine electrolyzer	J. Kim, S. Abbas, H.-J. Shin, S. B. H. Rizvi, K. B. Lee, y H. Y. Ha	Estrategias para la correcta implementación de electrolizadores.	2023
34	Techno-enviro-economic analysis of hydrogen production via low and high temperature electrolyzers powered by PV/Wind turbines/Waste heat	M. Nasser y H. Hassan	Análisis económico de producción de hidrógeno mediante electrolizadores a baja temperatura.	2023
35	Thermo-economic performance maps of green hydrogen production via water electrolysis powered by ranges of solar and wind energies	M. Nasser y H. Hassan	Análisis económico del rendimiento de un sistema de producción de hidrógeno por electrólisis del agua.	2023

---

### 3.1 Comparación del ciclo de vida de diferentes tecnologías de producción de hidrógeno

El análisis del ciclo de vida (LCA, *Life Cycle Assessment*) de las tecnologías de producción de GH permite evaluar su impacto ambiental en términos de emisiones de carbono, uso de recursos naturales y generación de desechos a lo largo de toda la cadena de valor [2]. Tal como se ilustra en la Figura 2, la producción de hidrógeno está directamente relacionada con la potencia generada por sistemas de energías renovables, tema que será abordado en detalle en las siguientes secciones.



**Figura 2.** Curva de producción de hidrógeno [8].

La Figura 3 compara las características ambientales y de producción entre distintas formas de hidrógeno. El hidrógeno gris se obtiene a partir de combustibles fósiles como el gas natural, generando entre 9 y 12 kg de CO<sub>2</sub> por kg de H<sub>2</sub> producido, lo que lo convierte en una de las opciones con mayor impacto ambiental [2]. El hidrógeno azul representa una variante con captura y almacenamiento de carbono, lo que reduce las emisiones en un 50–70 %, aunque aún enfrenta desafíos técnicos y económicos [2]. Finalmente, el hidrógeno verde, producido a partir de fuentes renovables, presenta emisiones prácticamente nulas en su etapa de generación. No obstante, su impacto total depende del ciclo de vida de los sistemas renovables empleados. Este trabajo se enfoca específicamente en la producción basada en energía solar [2].

### 3.2 Tecnologías de producción de hidrógeno verde a partir de energía solar

Las tecnologías de producción de GH mediante energía solar incluyen principalmente la generación fotovoltaica, la fotocátalisis, la termólisis asistida y sistemas híbridos. Los PV aprovechan la irradiación solar para generar electricidad, destacando su eficiencia en zonas con alta radiación solar. Estudios como los de Nasser y Hassan [10] ,[11] reportan eficiencias promedio de conversión del 22 %, siendo superiores en comparación con regiones de baja radiación o con recursos eólicos variables.

#### Fotocátalisis solar

La Figura 4 presenta un esquema de un sistema híbrido off-grid que combina fuentes solares y térmicas. La fotocátalisis solar, en tanto, utiliza materiales semiconductores que permiten dividir el agua en hidrógeno y oxígeno sin electricidad externa. Se están explorando nuevos fotocatalizadores, como los basados en óxidos metálicos o perovskitas, para mejorar la eficiencia [1]. Por su parte, la termólisis asistida por energía solar emplea concentradores solares (CSP- *Concentrated Solar Power*) para alcanzar temperaturas elevadas y descomponer térmicamente el agua, con investigaciones enfocadas en materiales resistentes al calor [1]. La hibridación

tecnológica —combinando generación fotovoltaica, almacenamiento térmico y eólico— ha demostrado mejorar la estabilidad y eficiencia de producción de GH [1].

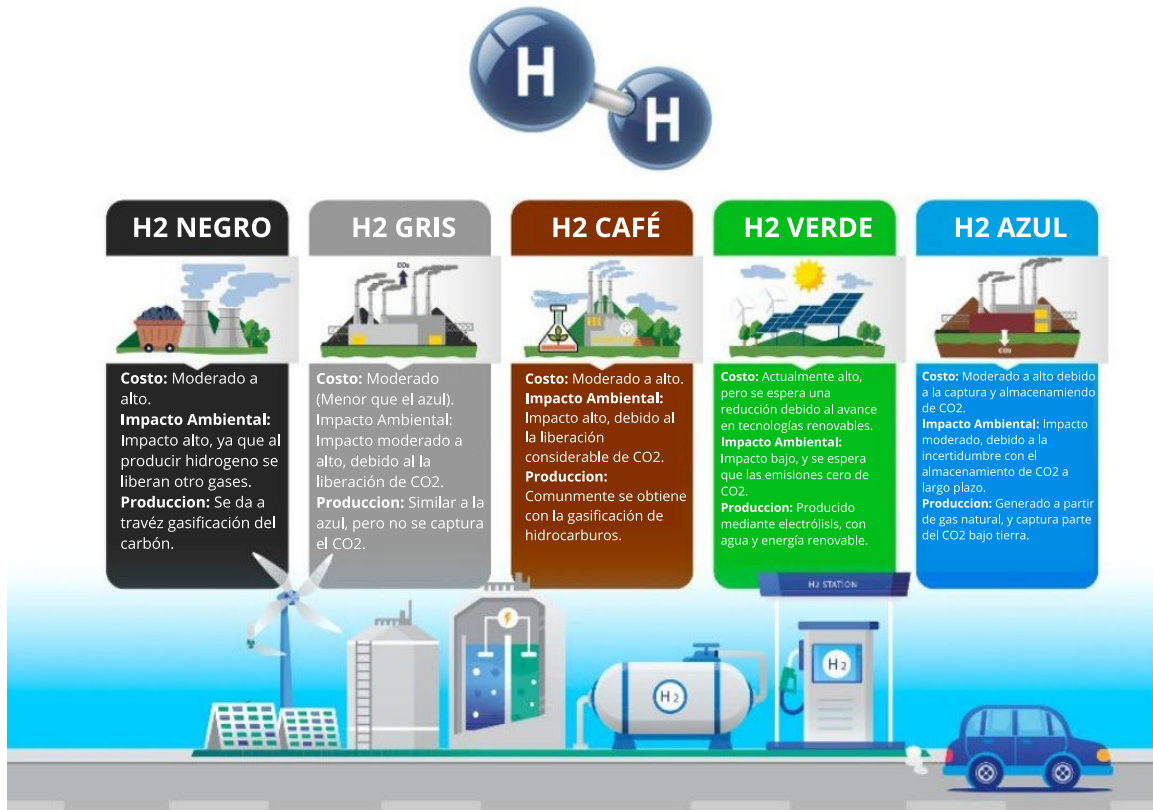


Figura 3. Comparación entre diferentes tipos de hidrógeno [9].

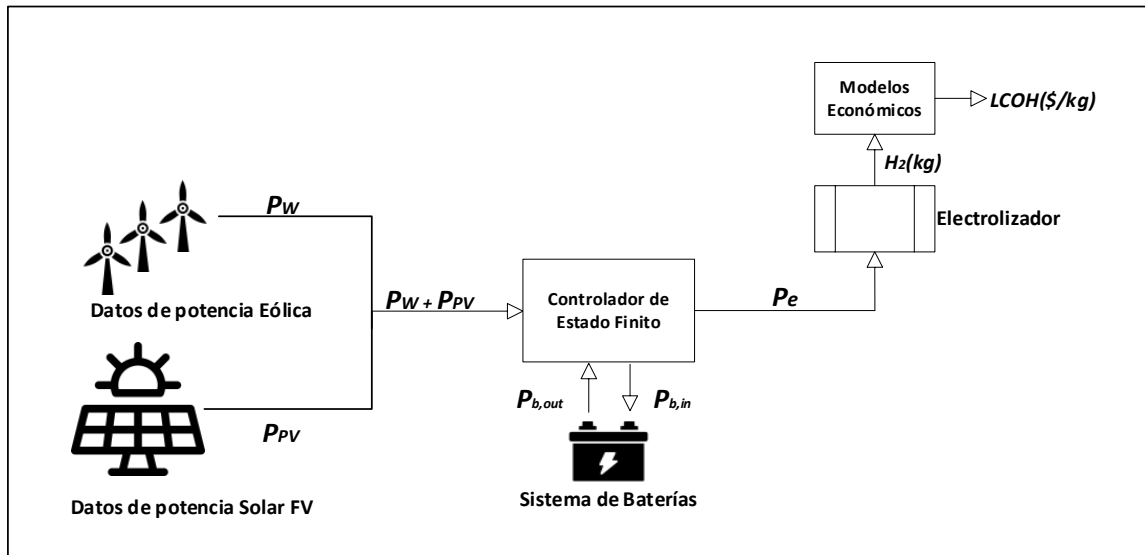
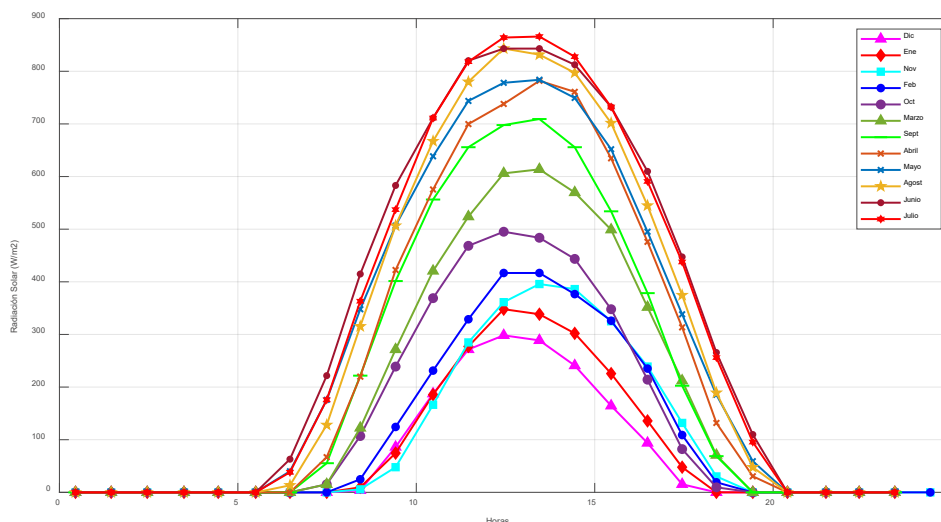


Figura 4. Esquema de un sistema de producción de hidrógeno con fuentes híbridas – sistema off grid [12].

### Electrólisis del agua con energía solar

En la Figura 5 muestra la radiación solar promedio de un caso de estudio, lo cual influye directamente en la producción de GH mediante electrólisis del agua. Este proceso emplea

electricidad generada por paneles fotovoltaicos para descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno. Según lo señalado en [5], los sistemas fotovoltaicos pueden producir hasta 0,0334 kgH<sub>2</sub>/kWh en condiciones óptimas, superando en rendimiento a los sistemas eólicos, que sufren de mayor intermitencia. Por su parte, en [13] se estima que, en un sistema de 60 kW, la producción anual promedio puede alcanzar hasta 2 toneladas de hidrógeno.



**Figura 5.** Radiación solar promedio en un lugar de estudio [14].

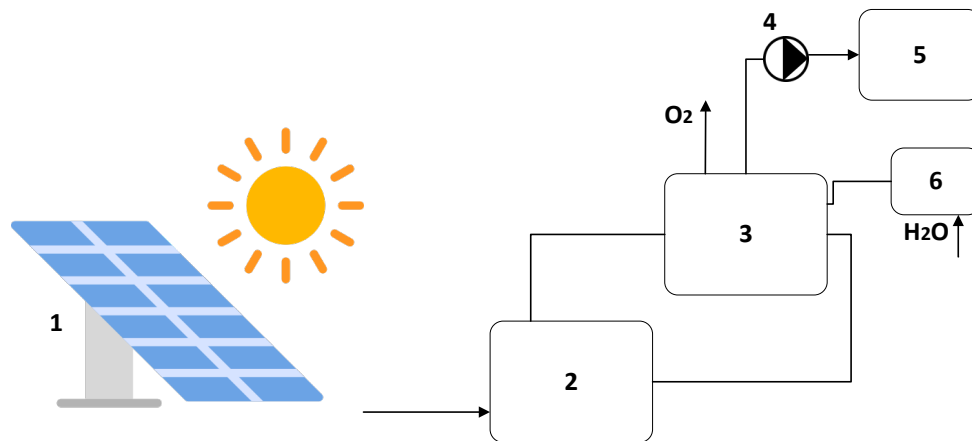
La eficiencia de estos sistemas depende en gran medida del tipo de electrolizador utilizado. En particular, los electrolizadores PEM se destacan por su rápida respuesta a variaciones de energía y buena eficiencia, lo que los hace atractivos para aplicaciones comerciales. No obstante, los electrolizadores SOEC operan a temperaturas más elevadas y aprovechan el calor residual, alcanzando hasta un 91 % de eficiencia frente al 66 % de los sistemas PEM [5], [10], [11]. Estos resultados evidencian la necesidad de seleccionar la tecnología de electrólisis adecuada según el contexto operativo.

En [5], la eficiencia del sistema global se calculó en función de la relación entre la energía eléctrica suministrada y la energía del hidrógeno producido, considerando su poder calorífico inferior (LHV). Se encontró que la eficiencia puede variar entre 11,6 % en sistemas solares y 22,91 % en sistemas que aprovechan calor residual. Asimismo, en [15] se señala que esta eficiencia depende de la coincidencia entre la potencia del sistema fotovoltaico y el punto de máxima potencia (MPP) del electrolizador, alcanzando eficiencias globales de hasta un 90 % en condiciones óptimas.

Además, se han reportado estrategias que permiten mitigar la intermitencia solar, como el uso de paneles bifaciales combinados con recubrimientos de alto albedo. Estas soluciones aumentan la captación de radiación reflejada y estabilizan el suministro energético [6].

La Figura 6 esquematiza el sistema completo de producción de GH mediante electrólisis del agua alimentado por energía solar, incluyendo sus componentes clave: módulos fotovoltaicos, inversores, electrolizadores, bombas, unidades de almacenamiento y sistemas auxiliares de solución.

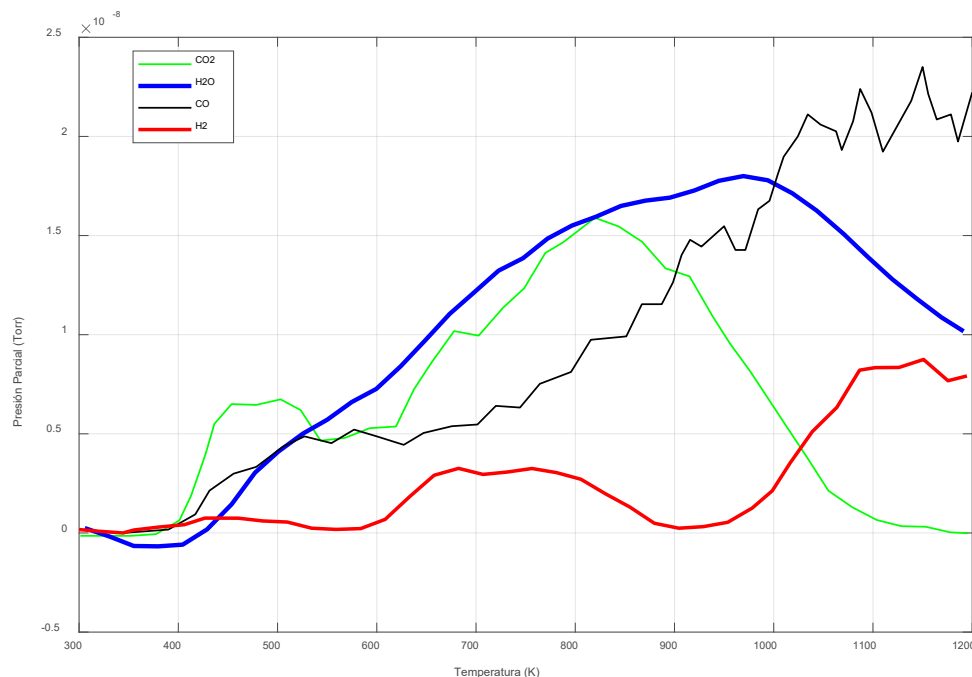




**Figura 6.** Esquema general de producción de hidrógeno por electrólisis del agua usando energía solar: 1-FV, 2-inversor, 3-electrolizador, 4-bomba, 5-almacenamiento de hidrógeno, 6-bloque de preparación de la solución [16].

### Fundamentos de la electrólisis del agua para la generación de hidrógeno verde

La electrólisis del agua es un proceso electroquímico en el que el agua se descompone en hidrógeno y oxígeno utilizando electricidad. La Figura 7 complementa este análisis mostrando el espectro de evolución de productos de la electrólisis, donde intervienen múltiples factores como temperatura, presión y conductividad del electrolito, los cuales inciden sobre la eficiencia [3].

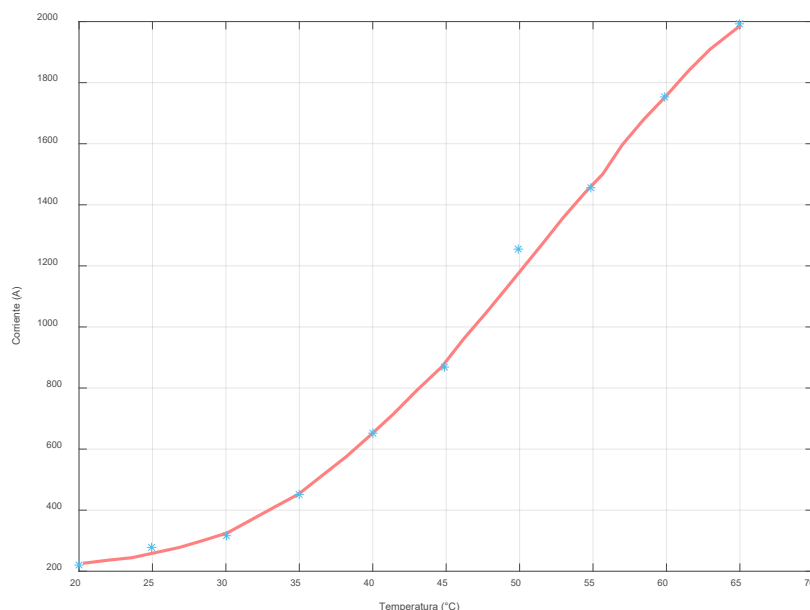


**Figura 7.** Espectro de evolución de los productos de la reacción química de la electrólisis del agua [17].

### Tecnologías de electrólisis disponibles

Entre las tecnologías más empleadas para la producción de GH se encuentran la electrólisis AEL, la PEM y la SOEC. Cada una presenta ventajas y desafíos particulares que deben considerarse en función del entorno de implementación.

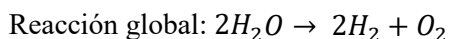
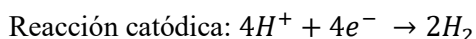
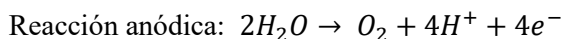
La AEL utiliza un electrolito líquido alcalino, como KOH o NaOH, y es una tecnología madura con costos relativamente bajos. Sin embargo, su eficiencia es menor y su capacidad de respuesta ante fluctuaciones de energía renovable es limitada [3]. Uno de los aspectos críticos en el diseño de sistemas AEL es la relación entre la corriente y la temperatura. La Figura 8 muestra datos reales de pruebas del fabricante, donde se observa que, si la temperatura del stack supera los 65 °C, la corriente recomendada se restringe a 2.000 A para evitar sobrecalentamientos y daños estructurales. A partir de estos datos, se empleó un ajuste polinómico de quinto grado para modelar los valores de corriente recomendados a distintas temperaturas.



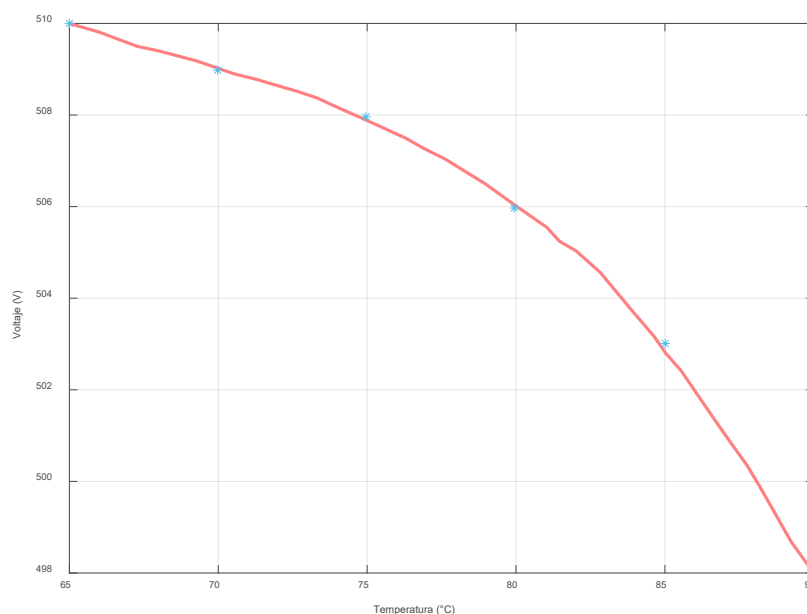
**Figura 8.** Relación entre los valores de corriente y temperatura recomendadas [18].

Adicionalmente, la resistencia del stack tiene una relación directa con la temperatura operativa. A medida que esta se aproxima al nivel óptimo, se reduce el voltaje de la celda, disminuyendo el consumo energético. La Figura 9 ilustra esta relación, basada también en datos de pruebas del fabricante, y permite calcular el límite de potencia operativa del sistema multiplicando los valores de voltaje y corriente a una temperatura dada [18].

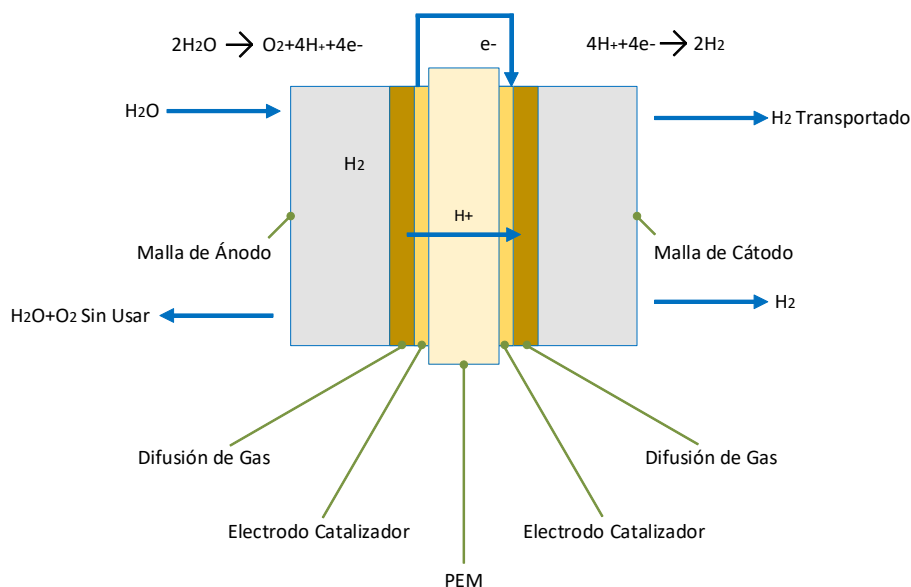
En cuanto a los electrolizadores PEM, estos emplean una membrana polimérica para separar gases, ofreciendo alta eficiencia y rápida respuesta a variaciones de energía. No obstante, requieren materiales costosos como platino e iridio [3]. Su vida útil oscila entre 60.000 y 100.000 horas, con tasas de degradación de 4–8 mV/h, lo cual implica una pérdida de eficiencia del 3–5 % a lo largo del tiempo. La operación intermitente no afecta significativamente su desempeño, siempre que la densidad de corriente se mantenga por debajo de 1,0 A/cm<sup>2</sup> [15]. Las reacciones involucradas son:



La Figura 10 representa esquemáticamente un módulo PEM, mostrando sus componentes principales [19].



**Figura 9.** Relación entre los valores de voltaje y temperatura recomendadas [18].



**Figura 10.** Esquema de un módulo PEM [19].

La tecnología SOEC, por su parte, opera entre 700 y 1.000 °C y emplea electrolitos cerámicos. Su principal ventaja es la alta eficiencia termodinámica, favorecida por la posibilidad de integración con fuentes de calor residual. Esto permite una mayor tasa de producción de GH, aunque requiere materiales resistentes a altas temperaturas, lo cual incrementa sus costos [3], [13].

Por último, tecnologías emergentes como los electrolizadores de membrana bipolar (BPM) y de membrana de intercambio catiónico (CEM) buscan superar las limitaciones de eficiencia y pérdida de  $CO_2$  en sistemas de conversión electroquímica. Estos dispositivos han demostrado reducir la formación de carbonatos, aunque enfrentan desafíos como la reacción competitiva de evolución de hidrógeno (HER), que afecta la eficiencia faradaica [20].

La Tabla 2 resume las diferencias clave entre las tecnologías BPM/CEM, PEM, AEL y SOEC, considerando criterios como eficiencia, temperatura de operación, costos y aplicaciones típicas.

**Tabla 2.** Diferencias clave entre BPM/CEM, PEM, AEL, SOEC.

<b>Característica</b>	<b>BPM/CEM</b>	<b>PEM</b>	<b>AEL</b>	<b>SOEC</b>
Tipo de membrana	Bipolar (BPM) / Catiónica (CEM)	Polímero de intercambio de protones	Diafragma alcalino	Electrodo cerámico de óxidos sólidos
Transporte de iones	H <sup>+</sup> y OH <sup>-</sup> (según diseño)	H <sup>+</sup> (protones)	OH <sup>-</sup> (hidróxido)	O <sup>2-</sup> (oxígeno)
Condiciones de operación	Ácido-Alcalino	Ácido	Alcalino	Alta temperatura
Aplicaciones	Conversión de CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O a H <sub>2</sub>	Energía renovable, transporte	Industria química, energía renovable	Integración de calor residual
Eficiencia	Alta (con optimización)	Moderada a alta	Moderada	Muy alta (debido al uso de calor)

### 3.3 Tendencias actuales y diseño de la planta de producción de hidrógeno verde

#### Optimización de la eficiencia energética

Las investigaciones recientes se centran en mejorar la eficiencia de conversión de la energía solar a hidrógeno mediante el desarrollo de electrolizadores más eficientes y de menor costo [1]. Se han evaluado tecnologías como los electrolizadores PEM y los sistemas de electrólisis AEL, considerando también innovaciones en materiales, producción masiva de paneles solares y la reducción del uso de metales preciosos como el platino [6].

Asimismo, se estudia el dimensionamiento óptimo de paneles solares, empleando tecnologías con seguimiento de un solo eje o doble eje para maximizar la captación de radiación solar. En particular, los paneles solares bifaciales han demostrado captar luz desde ambas caras, aprovechando la luz reflejada desde superficies de alto albedo. Esto incrementa la generación energética con la misma área instalada y reduce el costo por unidad de hidrógeno producido [7].

Adicionalmente, los recubrimientos de alto albedo aplicados sobre superficies reflectantes pueden incrementar la eficiencia del sistema hasta en un 20 %, dependiendo de las condiciones locales. Por su parte, los microinversores permiten optimizar la conversión de corriente continua a alterna a nivel de cada panel, reduciendo pérdidas por sombreados parciales y aumentando el rendimiento general del sistema [7].

#### Reducción de costos de producción

El costo de producción del GH está influenciado principalmente por el precio de la electricidad renovable, la eficiencia del electrolizador y los costos de capital (CAPEX) y operativos (OPEX) [3]. Entre las estrategias para reducir estos costos destacan el desarrollo de materiales más económicos y el aumento de la escala de producción. Ahmad *et al.* proponen modelos de evaluación de costos totales, gastos operativos y cálculo del LCOH [6].

La integración de paneles bifaciales con recubrimientos de alto albedo y microinversores ha demostrado mejorar la eficiencia energética y reducir los costos operativos, aumentando la competitividad del GH [7]. Además, Nasser y Hassan identifican que un incremento en la tasa de interés reduce el LCOH debido a una mayor tasa de descuento aplicada a los costos futuros. Sin embargo, la inflación actúa en sentido contrario: un aumento del 1 % en la tasa de inflación puede elevar el LCOH en hasta un 4 %, afectando la rentabilidad a largo plazo [11].

## Análisis técnico y económico

La viabilidad comercial del GH enfrenta desafíos económicos significativos, particularmente en cuanto a su competitividad frente a otras fuentes energéticas. Estudios recientes han evaluado distintas configuraciones fotovoltaicas —fijas, de seguimiento a un eje y doble eje— considerando parámetros como irradiación solar, eficiencia del sistema y capacidad operativa de los electrolizadores.

Uno de los indicadores clave es el LCOH, que representa el costo promedio de producción de GH a lo largo de la vida útil del sistema. Esta métrica considera la inversión inicial (CAPEX), los gastos operativos (OPEX), el consumo energético y la eficiencia del sistema [21].

Factores que afectan el LCOH:

- CAPEX: Incluye la inversión en paneles solares, turbinas eólicas, sistemas de electrólisis, almacenamiento y componentes del balance de planta (BOP). La selección de tecnologías como PEM impacta fuertemente este valor [18], [6].
- OPEX: Engloba los costos de operación, mantenimiento y reemplazo de componentes, así como la infraestructura de almacenamiento y transporte. La eficiencia puede optimizarse mediante sistemas de monitoreo y mantenimiento predictivo [18], [6].
- Costo de electricidad: Las regiones con mayor disponibilidad de energía renovable tienden a tener un LCOH más bajo [6].
- Eficiencia del sistema: Una electrólisis eficiente reduce el consumo energético y de agua, optimizando los costos operativos [6], [7].
- Incentivos y subsidios: Programas gubernamentales, subsidios fiscales y tarifas preferenciales pueden reducir significativamente el LCOH y mejorar la competitividad del GH frente a otras fuentes [18], [6].

La Ecuación 1, para el cálculo del LCOH, tal como se expone en [6], es:

$$LCOH = \frac{\sum(CAPEX + OPEX + Costo\ de\ Energía)}{\sum(Producción\ total\ de\ hidrógeno)} \quad (1)$$

Donde:

CAPEX = Costo de inversión inicial.

OPEX= Costos operativos anuales.

Costo de Energía = Costo de electricidad consumida.

Producción total de hidrógeno = Cantidad total de hidrógeno generado durante la vida útil de la planta.

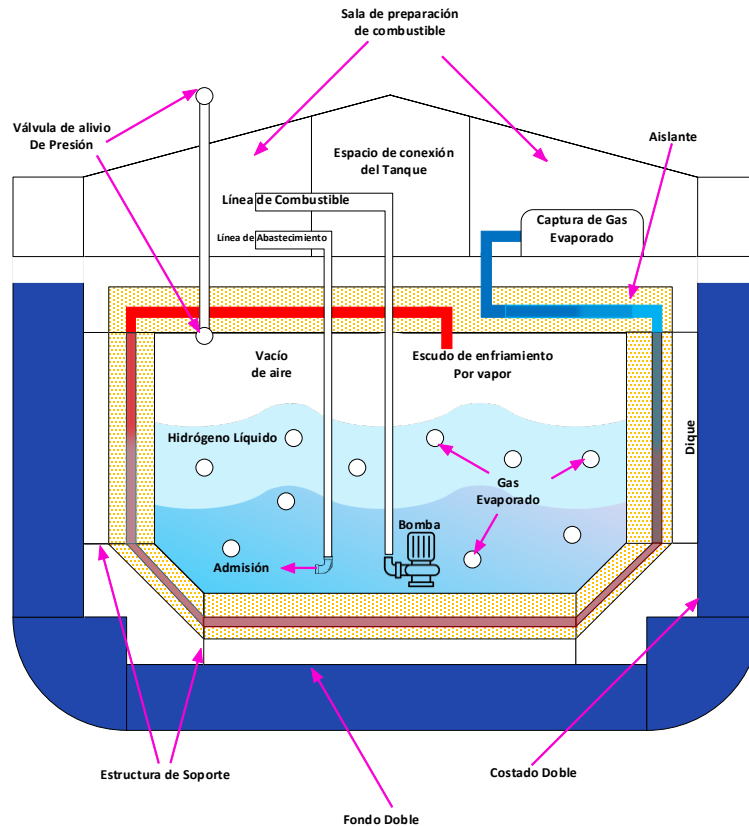
Retorno de inversión (IRR) y flujo de caja: El análisis en [11] mostró que los sistemas de recuperación de calor residual ofrecen el mejor retorno de inversión, con un PBP de 2,1 años y una IRR de hasta 48,15%, mientras que los sistemas solares presentan un PBP mayor, oscilando entre 11,1 y 16,9 años, debido a los costos de capital más altos.

## Desarrollo de infraestructuras de almacenamiento y distribución

El almacenamiento de hidrógeno es una de las principales barreras técnicas y económicas para su implementación a gran escala. Se evalúan múltiples opciones, entre ellas el almacenamiento en estado gaseoso, líquido, en forma de amoníaco, hidruros metálicos y soluciones subterráneas, cada una con diferentes niveles de madurez tecnológica y viabilidad económica [6], [1].

Entre los métodos existentes, el almacenamiento en estado gaseoso se realiza a alta presión (350–700 bar), lo que requiere infraestructura resistente y materiales avanzados para garantizar la seguridad. No obstante, el proceso de compresión consume energía adicional, reduciendo la eficiencia del sistema [22].

El almacenamiento en estado líquido implica enfriar el hidrógeno a temperaturas criogénicas (-253 °C), lo que conlleva un alto consumo energético y pérdidas por evaporación. La Figura 11 muestra un esquema de un tanque de almacenamiento criogénico, tecnología que, si bien es efectiva, aún requiere mejoras para ser viable económicamente [23].



**Figura 11.** Esquema de un tanque de almacenamiento de hidrógeno líquido [23].

Otra opción en desarrollo es el almacenamiento en materiales sólidos, utilizando hidruros metálicos o materiales adsorbentes. Estos permiten una mayor densidad de almacenamiento y menor riesgo de fugas. Las perovskitas, por ejemplo, han demostrado alta capacidad de absorción, estabilidad estructural y seguridad, aunque aún presentan retos relacionados con la liberación controlada del hidrógeno [22], [24].

Finalmente, la conversión de redes de gas natural para el transporte de hidrógeno es una estrategia en evaluación, orientada a aprovechar infraestructuras existentes y reducir costos logísticos [22].

### Integración y control del sistema

El desarrollo de sistemas de control integrados es esencial para garantizar la producción eficiente de GH y la estabilidad de la red eléctrica [6]. El dimensionamiento adecuado de los paneles solares y del sistema de almacenamiento en baterías es clave para lograr un suministro energético continuo [25].



Los microinversores optimizan la conversión de corriente a nivel de cada panel, mejorando la integración con la red eléctrica [7]. Además, los algoritmos de control inteligente permiten gestionar el flujo de energía entre los componentes del sistema —paneles, baterías, electrolizadores— para maximizar el rendimiento [25].

La implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real permite la detección temprana de fallos y el mantenimiento predictivo, reduciendo costos de operación y aumentando la disponibilidad del sistema [7]. Asimismo, el almacenamiento energético permite operar los electrolizadores durante períodos de baja demanda, optimizando el uso de energía renovable.

En términos eléctricos, los rectificadores de tiristores generan ondulaciones de corriente que pueden afectar la eficiencia del electrolizador por calor adicional. Los rectificadores basados en IGBT, en cambio, presentan menores ondulaciones y mejor eficiencia global [26]. En cuanto a las pérdidas de potencia, los rectificadores de tiristores mantienen pérdidas constantes debido a una corriente estable, mientras que los IGBT presentan pérdidas crecientes con el voltaje por conmutaciones a alta frecuencia [26].

La Figura 12 muestra un sistema independiente de producción de GH con unidad de almacenamiento, que integra el control, los paneles solares, el electrolizador y el almacenamiento [27].

### Políticas y normativas de apoyo

La adopción del GH está siendo respaldada por gobiernos e instituciones internacionales mediante marcos regulatorios, incentivos fiscales y estándares de certificación, orientados a acelerar su despliegue y asegurar su sostenibilidad [1].

### Proyectos piloto y escalabilidad industrial

Se han implementado proyectos piloto en distintas regiones del mundo para demostrar la viabilidad técnica y económica de la producción de GH mediante energía solar [1]. La modularidad de los sistemas fotovoltaicos —especialmente los bifaciales— permite ampliar progresivamente la producción sin inversiones iniciales elevadas, facilitando una adopción por etapas [7].

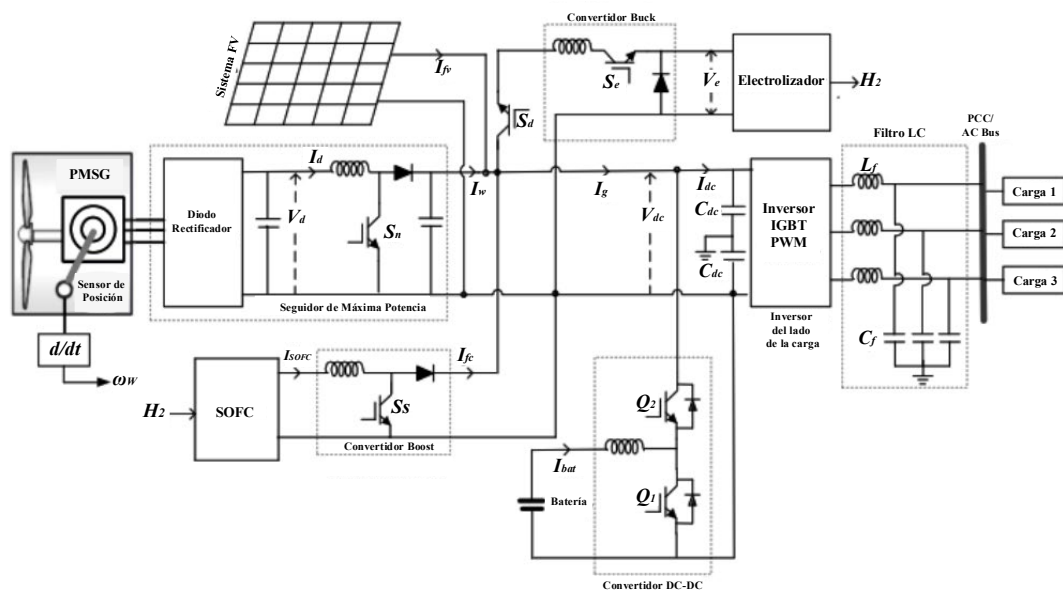


Figura 12. Sistema independiente con unidad de almacenamiento de hidrógeno [27].

La interconexión de estos sistemas con la red eléctrica permite aprovechar los excedentes y almacenarlos para uso posterior, contribuyendo a la flexibilidad y eficiencia del sistema. Esta estrategia reduce riesgos operativos y económicos, y permite validar el rendimiento a distintas escalas.

#### **Desafíos de la escalabilidad:**

- **Infraestructura de almacenamiento y transporte:** La falta de infraestructura adecuada para manejar hidrógeno de forma segura limita su expansión. Las tecnologías actuales como tanques de alta presión o criogénicos requieren grandes inversiones [18], [7]
- **Intermitencia de fuentes renovables:** La variabilidad solar afecta la producción continua de GH, lo que exige sistemas de almacenamiento energético eficientes [18].
- **Altos costos iniciales:** A pesar de la modularidad, los elevados costos de infraestructura y tecnologías avanzadas pueden ser una barrera en etapas iniciales [7].
- **Requisitos regulatorios y de seguridad:** La producción, almacenamiento y transporte de GH deben cumplir normativas estrictas, lo que implica tiempos prolongados de implementación y posibles barreras a la estandarización internacional [7], [18].

#### **Factores que afectan la viabilidad del proyecto**

La irradiación solar y la velocidad del viento son factores climáticos determinantes en la producción de energía renovable, así como en la viabilidad del GH [6]. Además, los costos de capital —especialmente por paneles y electrolizadores— representan las mayores inversiones iniciales, que pueden ser mitigadas mediante subsidios e incentivos gubernamentales.

#### **Soluciones para mejorar la viabilidad a largo plazo:**

- **Políticas públicas favorables:** establecer marcos regulatorios estables e incentivos fiscales que reduzcan las barreras de entrada y fomenten la inversión privada [18].
- **Innovación tecnológica:** promover la investigación en nuevos materiales para electrolizadores, estrategias de almacenamiento renovable y herramientas de simulación para optimizar el sistema antes de su implementación [18], [22].
- **Colaboraciones público-privadas:** establecer alianzas estratégicas entre gobiernos, universidades y empresas para desarrollar la infraestructura necesaria [18].
- **Desarrollo de mercados de hidrógeno:** crear redes logísticas eficientes para abastecer sectores clave como el transporte, la industria química y la generación eléctrica [18].

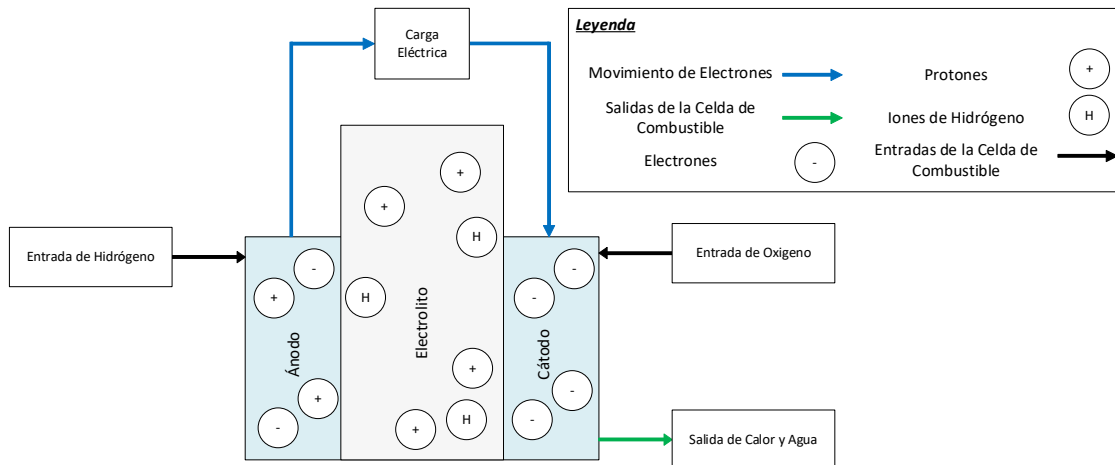
### **3.4 Aplicaciones del hidrógeno verde**

#### **Almacenamiento de energía renovable**

El hidrógeno verde puede almacenarse y posteriormente convertirse nuevamente en electricidad mediante celdas de combustible [3]. Estas representan una tecnología fundamental para la transición hacia una economía limpia, ya que convierten el hidrógeno en electricidad con emisiones prácticamente nulas. Debido a su alta eficiencia y flexibilidad operativa, han sido adoptadas en sectores como el transporte, la generación estacionaria de energía y aplicaciones industriales [28].

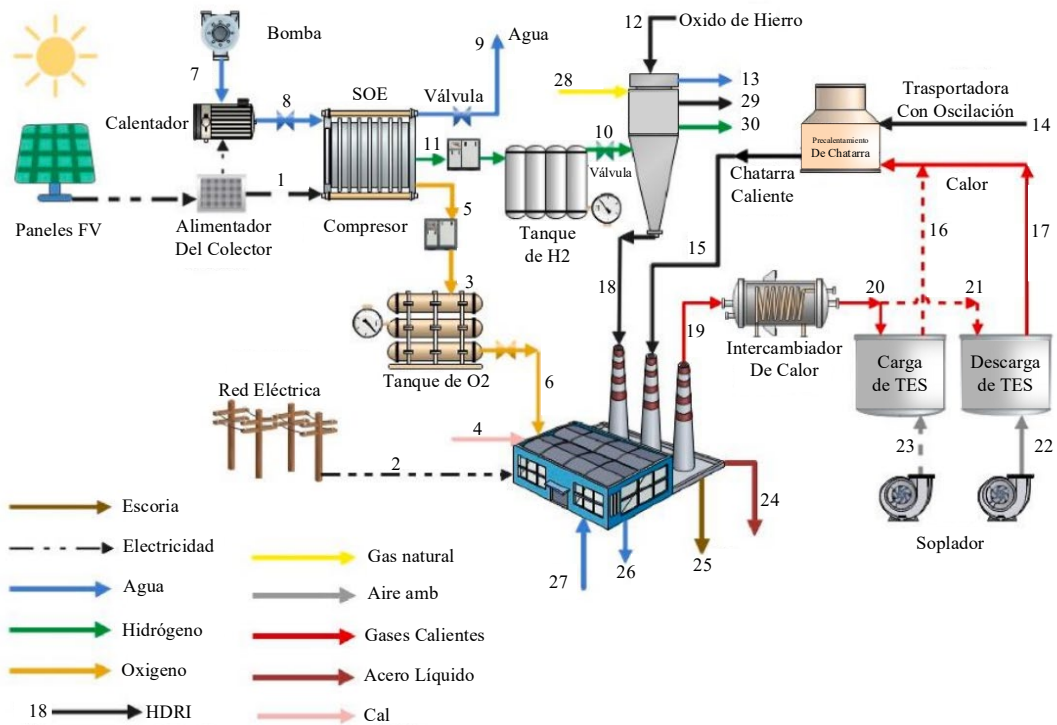
Las celdas de combustible operan a través de una reacción electroquímica entre hidrógeno y oxígeno, produciendo electricidad, agua y calor como subproductos. La Figura 13 muestra la estructura general de una celda de combustible [29]. Existen diferentes tipos, cada uno adaptado a condiciones específicas de operación y aplicación [19]:

- PEMFC (membrana de intercambio de protones): usadas en vehículos eléctricos, dispositivos portátiles y sistemas de respaldo.
- SOFC (óxido sólido): para generación estacionaria e industrial.
- AFC (celda alcalina): en aplicaciones aeroespaciales y de respaldo.
- MCFC (carbonato fundido): en generación a gran escala.
- PAFC (ácido fosfórico): en sistemas comerciales e industriales distribuidos.



**Figura 13.** Estructura general de un Fuel Cell [29].

Además, el uso del hidrógeno verde se está extendiendo a procesos industriales. La Figura 14 presenta un diagrama de una planta siderúrgica que utiliza hidrógeno como sustituto del carbón en la producción de acero [30].

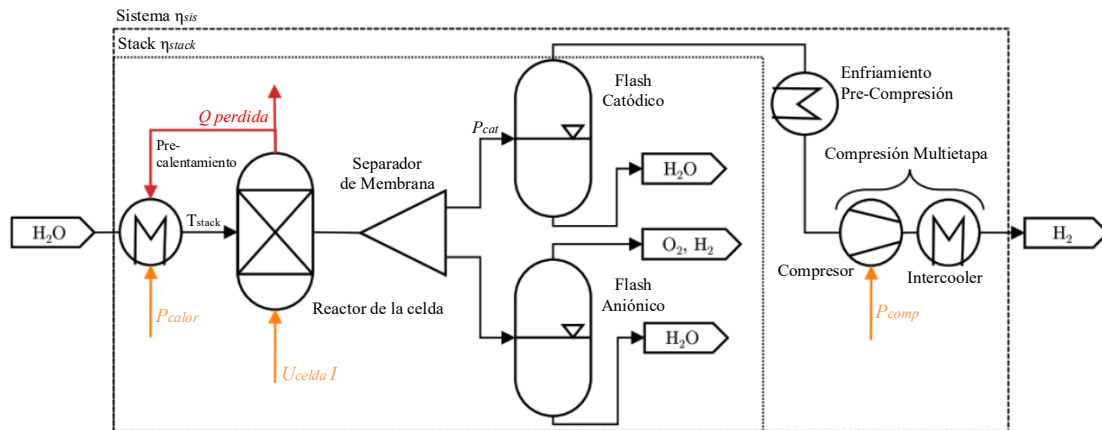


**Figura 14.** Diagrama de una planta de producción de acero usando hidrógeno verde [30].

### 3.5 Desafíos y perspectivas futuras

#### Desafíos técnicos

Entre los principales retos se encuentra la mejora en la durabilidad de los electrolizadores, el incremento de su eficiencia energética y la reducción de costos operativos [3]. La Figura 15 ilustra un sistema de electrólisis PEM, uno de los más estudiados en la actualidad por su eficiencia y tiempo de respuesta [31].



**Figura 15.** Sistema de electrólisis PEM [31].

El almacenamiento de energía también representa un reto clave en la transición energética. El hidrógeno es una de las soluciones más prometedoras para abordar la intermitencia de las fuentes renovables. Su integración en sistemas híbridos que combinen solar, eólica y almacenamiento en baterías permite mejorar la estabilidad de la red y maximizar la eficiencia energética [32].

Según lo indicado en [33], la optimización simultánea de temperatura y voltaje es esencial para mejorar el rendimiento de los electrolizadores. El estudio recomienda el uso de membranas avanzadas y una adecuada gestión del flujo de reactantes para superar los principales obstáculos técnicos.

#### Desafíos económicos

La competitividad del hidrógeno verde frente a fuentes fósiles aún depende fuertemente de subsidios e incentivos gubernamentales [3]. La reducción de los costos de los paneles solares y el aumento en la eficiencia de los electrolizadores son medidas clave para disminuir el LCOH. Asimismo, la mejora en la infraestructura de almacenamiento impacta positivamente en la reducción de costos operativos [6].

#### Tendencias futuras

El desarrollo de nuevos catalizadores asequibles y la integración de sistemas de electrólisis con redes inteligentes se perfilan como prioridades en el corto y mediano plazo [3]. Según lo expuesto en [34], una planificación óptima de los parques de energía renovable es fundamental para garantizar la eficiencia en la producción de hidrógeno verde.

Por otro lado, en [35] reportan que los electrolizadores de membrana de intercambio aniónico (AEM-WE) con membranas Aemion+® pueden operar de forma estable durante más de un año, con mínima degradación y alta eficiencia. Esta tecnología representa una alternativa competitiva frente a los sistemas PEM-WE y AWE, destacando por sus menores costos de capital y operación.

#### 4. DISCUSIÓN

Los resultados derivados de esta revisión bibliográfica permiten identificar avances, desafíos y oportunidades clave para el desarrollo sostenible del GH basado en energía solar. La eficiencia del proceso de producción depende en gran medida de la tecnología de electrólisis empleada y de la disponibilidad y calidad del recurso solar en el sitio de implementación.

Entre las tecnologías analizadas, los electrolizadores SOEC han demostrado rendimientos superiores, con una eficiencia de hasta el 91 %, lo que los posiciona como una alternativa prometedora para aplicaciones industriales a gran escala. No obstante, su implementación enfrenta obstáculos asociados a su elevado costo y a la necesidad de materiales capaces de operar en condiciones térmicas extremas. En contraste, los electrolizadores PEM alcanzan eficiencias de aproximadamente 66 % y presentan ventajas en cuanto a tiempos de respuesta y flexibilidad operativa, siendo preferidos para aplicaciones dinámicas o descentralizadas.

Desde una perspectiva económica, el LCOH varía significativamente dependiendo de la tecnología utilizada y la configuración del sistema. Los CAPEX se sitúan entre 1.500 y 2.200 USD/kW, mientras que los OPEX representan entre el 3 % y el 5 % del CAPEX. La inclusión de incentivos gubernamentales, mecanismos de financiamiento sostenibles y el aprovechamiento de economías de escala se perfilan como estrategias decisivas para reducir el LCOH, haciéndolo competitivo frente a fuentes fósiles. Además, se ha observado que factores macroeconómicos como la inflación y las tasas de interés influyen directamente en la viabilidad financiera de los proyectos.

En cuanto al almacenamiento, se identificaron tres métodos principales: almacenamiento en estado gaseoso, líquido y en materiales sólidos. El almacenamiento en estado gaseoso, aunque ampliamente utilizado, requiere altas presiones (hasta 700 bar) y materiales estructurales avanzados. El almacenamiento en estado líquido, si bien ofrece mayor densidad energética, conlleva altos costos energéticos asociados a procesos criogénicos. Por otro lado, el almacenamiento en materiales sólidos, como hidruros metálicos o perovskitas, representa una alternativa emergente con importantes beneficios en términos de seguridad y estabilidad estructural, aunque requiere superar desafíos técnicos relacionados con la cinética de absorción y liberación del hidrógeno.

Uno de los hallazgos más relevantes de esta revisión es que la eficiencia del sistema puede incrementarse hasta en un 33 % mediante la combinación de paneles solares bifaciales, recubrimientos de alto albedo y microinversores. Esta estrategia permite una mayor captación de radiación, optimización en la conversión energética a nivel de cada módulo y reducción de pérdidas por sombreados parciales, lo que contribuye significativamente a garantizar un suministro energético más estable y continuo para la electrólisis.

#### 5. CONCLUSIONES

El GH producido a partir de energía solar se consolida como una solución clave en la transición hacia sistemas energéticos sostenibles y libres de carbono. Esta tecnología tiene el potencial de transformar sectores intensivos en emisiones, como la industria y el transporte, mediante una fuente limpia, versátil y almacenable. La revisión muestra que tecnologías como SOEC alcanzan eficiencias superiores al 90 %, mientras que los sistemas PEM destacan por su flexibilidad operativa; sin embargo, su aplicación a gran escala sigue condicionada por aspectos técnicos, económicos y logísticos.

Uno de los principales desafíos es la reducción del LCOH, el cual depende de múltiples factores como el precio de la electricidad renovable, la eficiencia de los electrolizadores y los costos asociados al almacenamiento y transporte. En este sentido, se identificó que estrategias como el uso de paneles solares bifaciales, recubrimientos de alto albedo y microinversores

permiten mejorar la eficiencia del sistema hasta en un 33 %, reduciendo así el LCOH y mejorando la estabilidad del suministro energético.

Además, el análisis reveló que la hibridación de tecnologías renovables, junto con sistemas inteligentes de control y almacenamiento —incluyendo soluciones basadas en hidruros metálicos o criogenia—, es esencial para mitigar la intermitencia de las fuentes solares y asegurar una producción continua y eficiente de GH. No obstante, estas tecnologías deben superar desafíos relacionados con su escalabilidad, seguridad y viabilidad técnica.

Los resultados también subrayan que una reducción sostenida del LCOH solo será posible si se combinan mejoras tecnológicas con medidas regulatorias y esquemas de inversión adecuados.

Finalmente, la colaboración estratégica entre gobiernos, industria y comunidad científica será crucial para superar las barreras identificadas. Este enfoque coordinado puede facilitar el desarrollo de infraestructura, reducir los costos de implementación y fomentar aplicaciones concretas en sectores de alta demanda energética.

**AGRADECIMIENTOS:** Los autores agradecen a la Universidad de Cuenca por facilitar el acceso al Laboratorio de Micro-Red, Facultad de Ingeniería, en cuyas instalaciones se realizó la presente investigación.

## REFERENCIAS

- [1] M. S. Herdem *et al.*, “A brief overview of solar and wind-based green hydrogen production systems: Trends and standardization”, *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 51, pp. 340-353, Jan. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.172>
- [2] M. Awad *et al.*, “A review of water electrolysis for green hydrogen generation considering PV/wind/hybrid/hydropower/geothermal/tidal and wave/biogas energy systems, economic analysis, and its application”, *Alex. Eng. J.*, vol. 87, pp. 213-239, Jan. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.12.032>
- [3] M. M. Meshesha, D. Chanda, y B. L. Yang, “Efficient green hydrogen production through metal–organic framework-derived Ni and Co mediated iron selenide hexagonal nanorods and wireless coupled with photovoltaics for urea and alkaline water electrolysis”, *Appl. Catal. B Environ. Energy*, vol. 344, pp. 123635, May. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2023.123635>
- [4] A. Abdurakhmanov *et al.*, “Hydrogen production using solar energy”, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 937, no. 4, pp. 042042, Dec. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/4/042042>
- [5] K. Sayed *et al.*, “Feasibility Study and Economic Analysis of PV/Wind-Powered Hydrogen Production Plant”, *IEEE Access*, vol. 12, pp. 76304-76318, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3406895>
- [6] F. F. Ahmad, O. Rejeb, G. Boudekji, y C. Ghenai, “Green hydrogen production using bifacial solar photovoltaics integrated with high-albedo roof coating & micro-inverter”, *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 56, pp. 642-650, Feb. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.12.261>
- [7] F. Gutiérrez-Martín, L. Amodio, y M. Pagano, “Hydrogen production by water electrolysis and off-grid solar PV”, *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 46, no. 57, pp. 29038-29048, Aug. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.098>



- [8] D. Virah-Sawmy, F. J. Beck, y B. Sturmberg, “Ignore variability, overestimate hydrogen production – Quantifying the effects of electrolyzer efficiency curves on hydrogen production from renewable energy sources”, *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 72, pp. 49-59, Jun. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.360>
- [9] Z. Saadat, M. Farazmand, y M. Sameti, “Integration of underground green hydrogen storage in hybrid energy generation”, *Fuel*, vol. 371, pp. 131899, Sep. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131899>
- [10] M. Nasser, y H. Hassan, “Techno-enviro-economic analysis of hydrogen production via low and high temperature electrolyzers powered by PV/Wind turbines/Waste heat”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 278, pp. 116693, Feb. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116693>
- [11] M. Nasser, y H. Hassan, “Thermo-economic performance maps of green hydrogen production via water electrolysis powered by ranges of solar and wind energies”, *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 60, pp. 103424, Dec. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103424>
- [12] A. Ibáñez-Rioja *et al.*, “Off-grid solar PV–wind power–battery–water electrolyzer plant: Simultaneous optimization of component capacities and system control”, *Appl. Energy*, vol. 345, pp. 121277, Sep. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121277>
- [13] M. Nasser, T. F. Megahed, S. Ookawara, y H. Hassan, “Performance evaluation of PV panels/wind turbines hybrid system for green hydrogen generation and storage: Energy, exergy, economic, and enviroeconomic”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 267, pp. 115870, Sep. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115870>
- [14] R. A. Younis, E. Touti, M. Aoudia, W. Zahrouni, A. I. Omar, y A. H. Elmetwaly, “Innovative hybrid energy storage systems with sustainable integration of green hydrogen and energy management solutions for standalone PV microgrids based on reduced fractional gradient descent algorithm”, *Results Eng.*, vol. 24, Dic. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103229>
- [15] B. Hüner, “Mathematical modeling of an integrated photovoltaic-assisted PEM water electrolyzer system for hydrogen production”, *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 79, pp. 594-608, Aug. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.041>
- [16] S. G. Chalk, y J. F. Miller, “Key challenges and recent progress in batteries, fuel cells, and hydrogen storage for clean energy systems”, *J. Power Sources*, vol. 159, no. 1, pp. 73-80, Sep. 2006. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.04.058>
- [17] R. Ojha *et al.*, “Insights into the structure-property relationships of activated carbon derived from phenolic resin for electrochemical storage of green hydrogen using proton battery”, *J. Energy Storage*, vol. 107, Jan. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114912>
- [18] M. Chen *et al.*, “Enhancing the Efficiency of Multi-Electrolyzer Clusters with Lye Mixer: Topology Design and Control Strategy”, *Energy Eng.*, vol. 121, no. 10, pp. 3055-3074, Sep. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.32604/ee.2024.051524>

- [19] A. Boretti, “Estimating the efficiency of a PEM electrolyzer fed by a PV plant in NEOM City”, *Sol. Energy Adv.*, vol. 4, Sep. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seja.2024.100072>
- [20] H. Wu *et al.*, “Engineering the catalyst interface enables high carbon efficiency in both cation-exchange and bipolar membrane electrolyzers”, *Appl. Catal. B Environ. Energy*, vol. 361, Feb. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2024.124691>
- [21] A. Okunlola, M. Davis, y A. Kumar, “The development of an assessment framework to determine the technical hydrogen production potential from wind and solar energy”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 166, Sep. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112610>
- [22] M. Tao, J. A. Azzolini, E. B. Stechel, K. E. Ayers, y T. I. Valdez, “Review—Engineering Challenges in Green Hydrogen Production Systems”, *J. Electrochem. Soc.*, vol. 169, no. 5, May 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac6983>
- [23] S. Brouzas, M. Zadeh, y B. Lagemann, “Essentials of hydrogen storage and power systems for green shipping”, *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 100, pp. 1543-1560, Jan. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.253>
- [24] A. Eslami, S. A. Lachini, y M. Enhessari, “Green and sol-gel synthesis of perovskite type LaCo<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.8</sub>O<sub>3</sub> nanoceramics as potential materials for electrochemical hydrogen storage: A comparative study”, *Fuel*, vol. 386, Apr. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.134231>
- [25] A. Ibáñez-Rioja *et al.*, “Simulation methodology for an off-grid solar-battery-water electrolyzer plant: Simultaneous optimization of component capacities and system control”, *Appl. Energy*, vol. 307, Feb. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118157>
- [26] G. Hysa *et al.*, “Effect of voltage elevation on cost and energy efficiency of power electronics in water electrolyzers”, *J. Power Sources*, vol. 574, Aug. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233108>
- [27] A. Sony, K. Acharjya, K. Sharma, y N. Beemkumar, “Production of Green Hydrogen through Renewable Energy Sources based Microgrid”, en *E3S Web of Conferences*, 2024, pp. 1-13. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454011001>
- [28] J. Li, T. Wu, C. Cheng, J. Li, y K. Zhou, “A Review of the Research Progress and Application of Key Components in the Hydrogen Fuel Cell System”, *Processes*, vol. 12, no. 2, Jan. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/pr12020249>
- [29] M. Wong, y H. N. Afrouzi, “Hydrogen Energy Storage System: Review on Recent Progress”, *Energy Eng.*, vol. 122, no. 1, pp. 1-39, Dec. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.32604/ee.2024.056707>
- [30] A. Taji Eshkaftaki, E. Baniasadi, A. M. Parvavian, y A. Amiri, “In-house green hydrogen production for steelmaking decarbonization using steel slag as thermal energy storage material: A life cycle assessment”, *Energy*, vol. 313, Dic. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133966>

- [31] L. Bornemann, J. Lange, y M. Kaltschmitt, “Optimizing temperature and pressure in PEM electrolyzers: A model-based approach to enhanced efficiency in integrated energy systems”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 325, Feb. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119338>
- [32] A. Z. Arsad *et al.*, “Hydrogen energy storage integrated hybrid renewable energy systems: A review analysis for future research directions”, *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 47, no. 39, pp. 17285-17312, May 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.208>
- [33] J. Kim, S. Abbas, H.-J. Shin, S. B. H. Rizvi, K. B. Lee, y H. Y. Ha, “Strategies for simultaneous improvement of reaction rate and caustic efficiency of brine electrolyzer”, *Chem. Eng. J.*, vol. 476, Nov. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146706>
- [34] Y. Astriani, W. Tushar, y M. Nadarajah, “Optimal planning of renewable energy park for green hydrogen production using detailed cost and efficiency curves of PEM electrolyzer”, *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 79, pp. 1331-1346, Aug. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.107>
- [35] M. Moreno-González *et al.*, “One year operation of an anion exchange membrane water electrolyzer utilizing Aemion+® membrane: Minimal degradation, low H2 crossover and high efficiency”, *J. Power Sources Adv.*, vol. 19, Jan. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.powera.2023.100109>



# Integration of OSPF and SNMP for Network Monitoring and High Availability: Experimental Evaluation

*(Integración de OSPF y SNMP para supervisión y alta disponibilidad de redes: evaluación experimental)*

Holger Jorge Santillán Carranza, John Jairo Arellano Riera, Bryan Leonardo Catota Morocho, Peregrina Maria Wong Wong  
Salesian Polytechnic University, GISTEL Telecommunications Systems Research Group, Guayaquil, Ecuador  
[hsantillan@ups.edu.ec](mailto:hsantillan@ups.edu.ec), [jarellanor@est.ups.edu.ec](mailto:jarellanor@est.ups.edu.ec), [bcatotam@est.ups.edu.ec](mailto:bcatotam@est.ups.edu.ec), [p\\_wong@istsb.edu.ec](mailto:p_wong@istsb.edu.ec)

**Abstract:** This article implements the integration of OSPF (Open Shortest Path First) and SNMP (Simple Network Management Protocol) to increase the availability of the Internet service and send alarms for fault detection, since nowadays in educational or corporate institutions it is important to maintain the continuity of the Internet service. The methodology implemented is of experimental type using a test bench in the network laboratory two FortiGate equipment were used with the objective of simulating two internet outlets with different providers maintaining a convergence through the OSPF protocol, thus guaranteeing high availability. In the tests performed, an average convergence time of 8,46 seconds was obtained. For fault detection and sending notifications, the PRTG service was used, which sends messages via email and Telegram, providing detailed information and proving to be an efficient integration to increase the availability of the internet service and notify failures for a prompt response and solution.

**Keywords:** Fault Detection, High Availability, Network Management, OSPF, PRTG, SNMP

**Resumen:** En este artículo se implementa la integración del protocolo OSPF (*Open Shortest Path First*) y SNMP (*Simple Network Management Protocol*) para incrementar la disponibilidad del servicio de internet y enviar alarmas para la detección de fallas, ya que hoy en día en instituciones educativas o corporativas es importante mantener la continuidad del servicio de internet. La metodología implementada es de tipo experimental utilizando un banco de pruebas en el laboratorio de redes. Se utilizaron dos equipos Fortigate con el objetivo de simular dos salidas de internet con diferentes proveedores manteniendo una convergencia a través del protocolo OSPF, garantizando así una alta disponibilidad. En las pruebas realizadas se obtuvo un tiempo medio de convergencia de 8,46 segundos. Para la detección de fallos y envío de notificaciones se utilizó el servicio PRTG, que envía mensajes por correo electrónico y Telegram, proporcionando información detallada y demostrando ser una integración eficiente para aumentar la disponibilidad del servicio de internet y notificar fallos para una pronta respuesta y solución.

**Palabras clave:** Alta disponibilidad, Detección de fallos, Gestión de redes, Confiabilidad en Comunicaciones, Optimización de rutas IP, PRTG

## 1. INTRODUCTION

Nowadays, the Internet is a fundamental resource for the development of academic, administrative and research activities. Institutions require a robust and reliable network infrastructure that guarantees service availability, avoiding interruptions that could affect the work of students, faculty and administrative staff [1]. To this end, dynamic routing protocols and tools to monitor and manage network traffic and detect possible failures must be implemented [2].

Enterprise networks and Internet Service Providers (ISPs) mainly use link-state routers to distribute the entire network topology by integrating protocols such as OSPF (Open Shortest Path First) or BGP (Border Gateway Protocol) to exchange information via routing [3]. While OSPF calculates the best routes based on link cost, guaranteeing fast convergence in case of failures, BGP, being an external protocol for massive networks, allows global connectivity in different autonomous systems [4].

For network monitoring, SNMP (Simple Network Management Protocol) is normally used, which allows obtaining important data on network behavior, interface and device status in real time. In addition, it allows the visualization of historical data through traffic consumption graphs by days, weeks or months and supports the sending of notifications through different media such as mail or messages in mobile networks [5].

Network traffic control and management are essential for the security of university networks. This study employs PRTG (Paessler Router Traffic Grapher) management tools and the FortiGate firewall to monitor and visualize campus network traffic in real time [6]. The implementation of PRTG Network Monitor sensors strategically distributed in the network infrastructure allows collecting statistics to optimize network traffic and ensure its performance [7].

A previous study [8] addressed the connectivity problem in the company XYZ, where a network with a high SLA (Service Level Agreement) and no downtime in the process of information exchange was required. The research plan is the implementation of a WAN (Wide Area Network) network using SD-WAN (Software-Defined Wide Area Network) technology against two ISPs in FortiGate, to ensure a high level of availability and minimize interruptions in the exchange of information.

In this context, the present study aims to implement a network architecture with high availability, based on the integration of the OSPF routing protocol and the SNMP management protocol, using FortiGate devices and the PRTG tool for monitoring and fault notification. It is proposed that this integration will significantly improve the continuity of the Internet service, facilitating an early detection of failures and a more efficient response, especially in educational environments where connectivity is critical for academic and administrative development [9].

The main contribution of this work is to validate, through an experimental laboratory implementation, the effectiveness of this technological solution as a viable alternative for proactive network management.

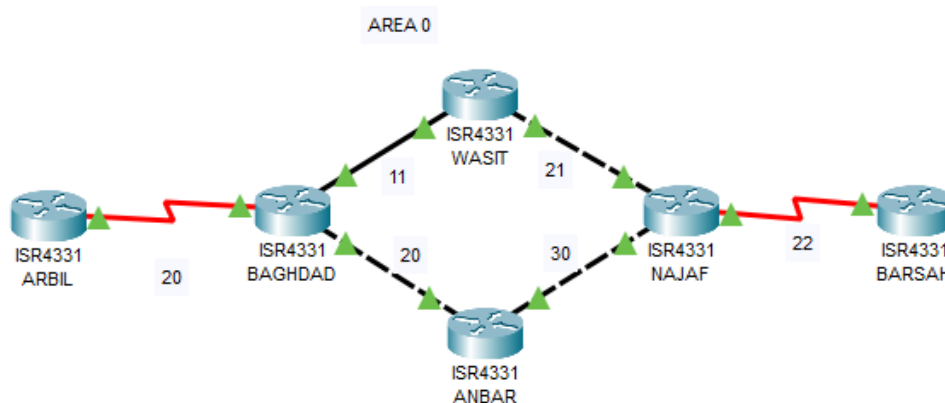
This study did not develop or optimize proprietary scripts or specific SNMP codes; rather, it conducted a practical evaluation of how OSPF and SNMP are integrated using PRTG as monitoring and management tools. In this context, PRTG was used solely to collect metrics and generate alerts in real time, while the indicators analyzed focused on aspects of network performance such as convergence times, the calculation of new routes, and bandwidth usage in high-availability scenarios. Thus, the main objective of the work is not to create custom SNMP tools, but to analyze the effectiveness of this integration and its impact on network operation.

The article is organized as follows: section 1 presents the introduction and related works and mathematical foundations; section 2 describes the methodology applied; section 3 presents and

analyzes the results obtained; section 4 discusses these results in contrast with similar approaches in the literature; and finally, section 5 presents the conclusions and raises possible lines of future research.

### 1.1.Related Works

OSPF is a dynamic routing protocol known for its convergence efficiency and support for large networks, making it a popular choice for enterprises and institutional networks. The OSPF protocol presents four types of networks to be distinguished, each with its own characteristics with handshake timers and timeouts [10].



**Figure 1.** OSPF Network Simulation Performed in Packet Tracer.

The article [11] describes the installation of 6 routers distributed among the main cities of Iraq, the design of the BGP network in Figure 1 shows a simulation in Packet Tracer that was performed to learn how to manage the costs in the prototype of the present work.

SNMP is a protocol used for network management and monitoring allowing administrators to centrally manage the network [12]. SNMP operates through a client server model, where network devices that support the protocol collect information and send it to the management server. This protocol uses MIB (Management Information Base) concepts to structure the information that can be monitored [13].

Fortinet's FortiGate routers provide essential functions such as firewall, VPN and access control, ideal for protecting networks especially in enterprise and educational environments. In addition, they offer advanced tools to analyze and monitor network traffic using the SNMP protocol, it is possible to obtain detailed traffic statistics and receive alerts about suspicious activities, facilitating real-time decision making to keep the network secure [14].

VirtualBox is an open-source tool that allows running multiple operating systems on a single physical machine. For the implementation of the proposed prototype, VirtualBox was used to simulate OSPF routing and SNMP monitoring scenarios using the GNS 3 system. The flexibility it offers allows configuring complex environments with several virtual devices that can be integrated with monitoring and management tools, such as PRTG [15].

Paessler PRTG is a network monitoring and supervision solution used to collect real-time data on traffic, bandwidth usage, and network infrastructure performance. It uses technologies such as SNMP [16]. PRTG allows alerts and notifications to be configured so that network administrators can react proactively to any failures or problems. Its intuitive user interface and ability to perform comprehensive network monitoring make it a popular tool in educational and enterprise networks [17].



Telegram is a social network that allows sending text, voice, audio and video messages in real time, allowing individual messaging between two people or group messaging facilitating the dissemination of information among several people at the same time. In the proposed prototype, Telegram was used for sending automatic messages from the PRTG system to a group with several people, since it offers end-to-end encryption and the use of bots for sending automatic messages using the free API (Application Programming Interface) [18].

The GNS3 (Graphical Network Simulator-3) is a free software that allows simulating simple and complex networks in a virtual environment and is based on the Dynamics system that simulates Cisco IOS devices, the most outstanding features of the GNS-3 software is a high quality design and the accessibility to analyze and simulate complex network topologies, apart from being compatible with Cisco IOS, it is also compatible with other platforms such as IPS, PIX and ASA firewalls, and JUNOS [19], [20].

## 1.2. Quantitative foundations for the evaluation of network performance

To understand how a network works and ensure that it performs as expected, it is necessary to look at some key technical parameters. They include the time it takes for the network to adapt to a failure (convergence), how much of the available bandwidth is being used, and how close the results are to what was theoretically expected. This data is especially useful in contexts where keeping the service active is crucial, such as in universities or companies [21].

This section presents three formulas that help to analyze the behavior of networks configured with the OSPF protocol and monitored by SNMP [22]. These mathematical tools make it possible to measure how quickly the network responds to a problem, whether resources are well utilized, and how accurately the system is operating compared to what was planned [23].

The convergence time is shown in Equation 1, which represents the optimal period for all routers within the same network to update their routing tables after a change in their structure, due to new connected equipment or outages.

$$Tc = Td + Tr \quad (1)$$

Where:

*Tc*: Convergence time (s).

*Td*: Failure detection time (s).

*Tr*: Time to recalculate new routes (s).

The bandwidth is presented in Equation 2, which allows calculating the percentage of bandwidth used in a network link in relation to its total capacity. It is very useful to evaluate efficiency and detect possible congestion in the network.

$$BW = \left( \frac{\text{actual use}}{\text{Full capacity}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

Where:

*BW*: Percentage of bandwidth used (%).

*Actual use*: Amount of Data Actually Transmitted Through the Link (Mbps).

*Full capacity*: Theoretical Maximum Link State Capacity (Mbps).

The error percentage can be calculated using Equation 3, which allows us to calculate the percentage considering the obtained value and the expected value.

$$\text{Error rate} = \left( \frac{|\text{Resultant value} - \text{Expected value}|}{\text{Expected value}} \right) \times 100 \quad (3)$$

Where:

*Error rate*: Calculated error rate (%).

*Resultant value*: Average of calculated result in actual tests (Mbps).

*Expected value*: Value to be expected according to capacity or target value (Mbps).

## 2. METHODOLOGY

The approach of the proposed prototype is experimental based on previous research and knowledge to review problems related to network configuration and monitoring. The main objective is to evaluate the integration of OSPF and SNMP protocols in network management, ensuring service availability through convergence and sending detailed failure reports via email messages and in the Telegram application.

Figure 2 details the phases in which the present work was carried out: the analysis, design and implementation phase, which were followed in detail to obtain accurate data and results based on the prototype that is intended to verify its correct operation and application.



**Figure 2.** Project Phases.

In the analysis phase, a review of articles, theses and books published in the last five years was carried out to build a solid theoretical basis to support the design and functionality of the prototype. The review identified the best practices as well as challenges in the implementation of OSPF and its integration with SNMP for fault detection and notification.

In the design phase, a simulation was developed using the GNS3 tool, to simulate the virtualized FortiGate equipment through VirtualBox, in this way multiple convergence tests were performed after having configured the OSPF protocol. Additionally, an SNMP monitoring system was configured using the PRTG tool installed in a laptop to receive and visualize alerts that allow an efficient supervision of the network status and to solve errors that may occur in the devices that make up the network structure.

The implementation phase involved the acquisition, connections and configuration of two FortiGate firewalls, and making the leap from the virtual environment to physical equipment, as well as the installation and adjustment of PRTG to carry out the infrastructure monitoring. Rigorous tests were carried out to verify connectivity, the correct propagation of routes through OSPF, and the operability of the PRTG system alerts.

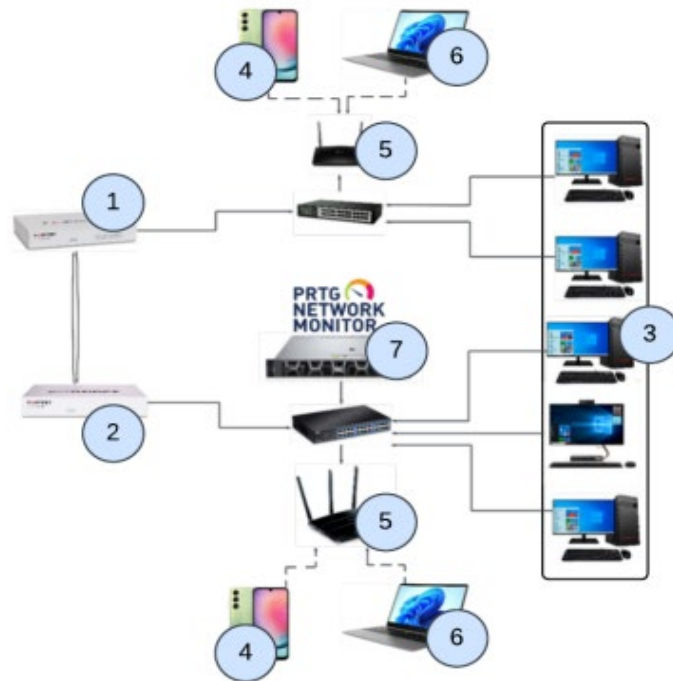
For this research, an experimental laboratory was designed with FortiGate devices configured with OSPF and monitored via SNMP. Instead of developing our own scripts or modifying the protocol primitives, we chose to use PRTG as the standard tool for collecting metrics and generating alerts. This platform was used solely to monitor data such as convergence times, new route calculations, and bandwidth utilization in real time under controlled conditions. In addition, multiple repeated tests were performed to ensure the consistency and statistical validity of the results, reflecting OSPF–SNMP integration in a realistic environment, without evaluating the performance of PRTG as a standalone product.

Finally, the results obtained in the tests were evaluated by analyzing the performance of the integration and the capacity to ensure the availability of the Internet service through dynamic routing with the OSPF protocol. Based on the interpretation of the project results, conclusions

and recommendations were drawn to optimize both the configuration and monitoring of the network.

Figure 3 shows the diagram of the proposed prototype of an OSPF network managed with the SNMP protocol, which is structured with its respective components. The components for the proposed prototype are detailed below:

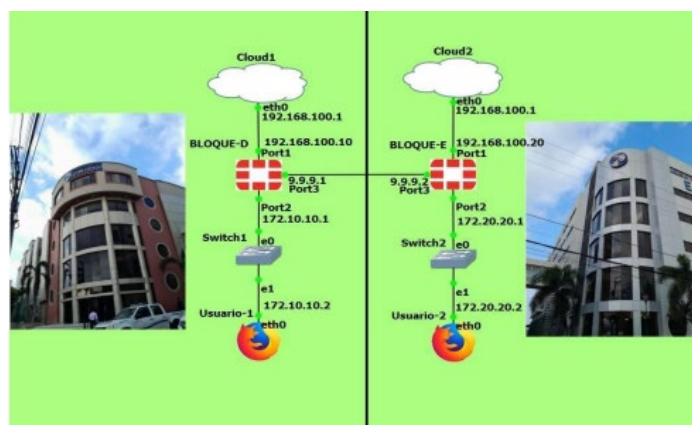
1. Fortinet FortiGate 30-E
2. Fortinet FortiGate 40-F
3. Computadora
4. Software GNS3
5. VMware Virtualbox
6. Smartphones
7. Router
8. Laptop
9. Paessler PRTG Network Monitor



**Figure 3.** Diagram of an OSPF Network Managed via the SNMP Protocol.

### 2.1. Prototype simulation

The simulation was carried out by downloading the GNS3 virtual machine and virtualizing it with VirtualBox and then installing the FortiGate devices. It was simulated by installing and configuring two FortiGate firewall devices in blocks D and E of the campus respectively and then configuring the network adapter of the virtual machine in bridge mode for the simulated computers to be on the internal network. Figure 4 shows the corresponding connections between the computers added to later add the IPS and network masks.



**Figure 4.** Simulation performed in GNS3.

Table 1 shows the configuration of the GNS3 simulation, including the networks, IP addresses and interfaces assigned to each of the FortiGate devices used. In the physical implementation, the IPs of the WAN interfaces were changed because the implementation was carried out in the laboratory networks using the IPs 172.18.133.10/24 and 172.18.133.11 respectively with Gateway 172.18.133.100.

**Table 1.** The configuration implemented in the GNS3 simulation.

Dispositivo	Puerto	IP	Mascara de Red	Gateway
<b>Fortigate Bloque D</b>	Port1 (WAN)	192.168.100.10	255.255.255.0	192.168.100.1
<b>Fortigate Bloque D</b>	Port2 (LAN)	172.10.10.1	255.255.255.0	N/A
<b>Fortigate Bloque D</b>	Port3 (OSPF)	9.9.9.1	255.255.255.252	N/A
<b>Fortigate Bloque E</b>	Port 1 (WAN)	192.168.100.20	255.255.255.0	192.168.100.1
<b>Fortigate Bloque E</b>	Port 2 (LAN)	172.20.20.1	255.255.255.0	N/A
<b>Fortigate Bloque E</b>	Port 3 (OSPF)	9.9.9.2	255.255.255.252	N/A

## 2.2. Prototype implementation

After the simulations in GNS3, where the use and management of the OSPF protocol operation was put into practice, in the equipment: FortiGate 30E (UPS-LAB1 or D-Block) and FortiGate 40F (UPS-LAB2 or E-Block). Figure 5 shows the physical implementation, the placement of the prototype in a rack where a test bench was subsequently carried out in the network laboratory, which is structured with the following components:

1. Fortinet FortiGate 30E
2. Fortinet FortiGate 40F
3. Pcs
4. Smartphone
5. Routers
6. Laptop
7. Paessler PRT



**Figure 5.** Physical implementation of the prototype.

Table 2 details the configuration of the physical implementation, including the networks, IP addresses and interfaces assigned to each of the FortiGate devices used.

**Table 2.** Configuration implemented in the physical setup.

Device	Port	IP	Subnet mask	Gateway
<b>Fortigate 30E UPS-LAB1</b>	WAN	172.18.133.10	255.255.255.0	172.18.133.100
<b>Fortigate 30E UPS-LAB1</b>	LAN port 1 y 2	172.10.10.1	255.255.255.0	N/A
<b>Fortigate 30E UPS-LAB1</b>	OSPF	9.9.9.1	255.255.255.252	N/A
<b>Fortigate 40F UPS-LAB2</b>	WAN	172.18.133.11	255.255.255.0	172.18.133.100
<b>Fortigate 40F UPS-LAB2</b>	LAN	172.20.20.1	255.255.255.0	N/A
<b>Fortigate 40F UPS-LAB2</b>	Port 3 OSPF	9.9.9.2	255.255.255.252	N/A

### 2.3. Equipment configuration

For FortiGate 30E the name UPS-LAB 1 was assigned, Figure 6 shows the interface configurations: LAN, WAN, Port 3 (OSPF), as well as the assigned networks and IP addresses. The LAN interface is configured in bridge mode and has interfaces lan1 and lan2 as members.

Subsequently, as shown in Figure 7, a default route was configured on the WAN interface to obtain output to the Internet, this route maintains an administrative distance of 10 so that this interface is preferred and only in case of failure it learns the default route through the OSPF link configured with the FortiGate 40F.

Hardware Switch 1			
lan	Hardware Switch	lan1 lan2	172.10.10.1/255.255.255.0
Physical Interface 3			
lan4	Physical Interface		0.0.0.0/0.0.0.0
UPS-LAB1 (lan3)	Physical Interface		9.9.9.1/255.255.255.252
wan	Physical Interface		172.18.133.10/255.255.255.0

**Figure 6.** Network and Interface Configuration on the Fortigate 30E.

UPS-LAB1

Edit Static Route

Destination Subnet Internet Service

Gateway Address: 0.0.0.0/0.0.0.0

Interface: wan

Administrative Distance: 10

Comments: Write a comment... 0/255

Static: Enabled Disabled

**Figure 7.** Static route configured on the WAN interface of the Fortigate 30E.

The FortiGate 40F was assigned the name UPS-LAB 2. Figure 8 shows the interface configurations: LAN, WAN, Port 3 (OSPF), as well as the assigned networks and IP addresses. The LAN interface is configured in bridge mode and contains as a member interfaces lan1 and lan2.

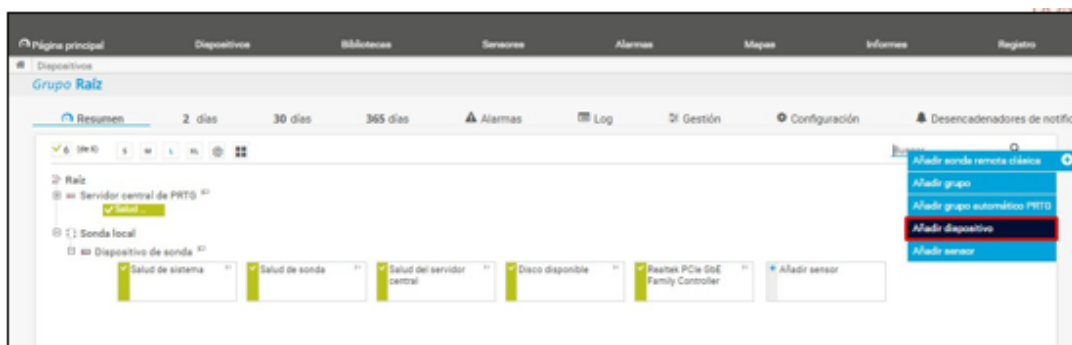
Hardware Switch 1			
lan	Hardware Switch	lan1 lan2	172.20.20.1/255.255.255.0
Physical Interface 3			
a	Physical Interface		0.0.0.0/0.0.0.0
UPS-LAB1 (lan3)	Physical Interface		9.9.9.2/255.255.255.252
wan	Physical Interface		172.18.133.11/255.255.255.0

**Figure 8.** Network and Interface Configuration on the Fortigate 40F.

After configuring the static route for the WAN interface, the advanced routing is activated to enable the OSPF protocol inside the FortiGate 40F following the same procedure that was performed in the FortiGate 30E, its respective loopback was configured with the IP 11.11.11.12, area 0 and the network mask 30 that is configured in port 3 that connects with the FortiGate 30E initiating the packet flow between both devices.



Once the respective configurations have been made between the FortiGate 30E and 40F, we proceed to manage them through SNMP, when entering the PRTG service interface the Devices tab is displayed where the list of configured sensors is obtained, in the same section the default sensors are configured in the Local Probe group that is monitoring the status of the machine or server where the service is installed. In this tab, both FortiGate were added by entering their names and IPs, as shown in Figure 9.



**Figure 9.** Interface displaying the devices and sensors section in PRTG.

This feature of the PRTG service allowed us to receive failure notifications by mail and failure alert messages through the Telegram social network thanks to its API that allows programming a bot to perform the function of generating alert messages in a more accessible way in the shortest possible time when failures occur in the network or a problem has been corrected, including notifying the threshold exceeded by incoming and outgoing network traffic.

### 3. ANALYSIS OF RESULTS

#### 3.1. Convergence results for FortiGate 30e and 40f

In this experimental evaluation, a series of convergence tests were performed to observe the routing behavior of FortiGate devices when a WAN failure occurs. As shown in Table 3, the tests consisted of manually disconnecting the WAN interface of the FortiGate 40F once per minute, while monitoring the reaction time using the PRTG platform. The objective was to measure key response variables related to OSPF behavior and SNMP-based alerting not to implement SNMP primitives or optimization scripts. The results revealed an average failure detection time of 4,70 seconds, defined as the interval between the link-down event and the device's internal update of its routing table. Additionally, the system took an average of 3,76 seconds to calculate and apply a new route based on available interfaces, learned networks, and dynamic default routes.

**Table 3.** Convergence tests performed by disconnecting the WAN interface of the FortiGate 40F.

Test	Date	Tc (s)	Td (s)	Tr (s)
1	22/1/2025 16:15	7,51	4,97	2,54
2	22/1/2025 16:16	6,52	4,31	2,21
3	22/1/2025 16:17	9,21	4,27	4,94
4	22/1/2025 16:18	8,95	5,09	3,86
5	22/1/2025 16:19	9,31	4,62	4,69
6	22/1/2025 16:20	6,34	1,06	5,28

7	22/1/2025 16:21	8,23	5,20	3,03
8	22/1/2025 16:22	9,90	4,99	4,91
9	22/1/2025 16:23	9,40	4,64	4,76
10	22/1/2025 16:24	9,48	5,18	4,30
11	22/1/2025 16:25	13,9	4,88	4,21
12	22/1/2025 16:26	12,7	4,67	3,98
13	22/1/2025 16:27	7,82	4,25	2,57
14	22/1/2025 16:28	8,12	5,01	3,11
15	22/1/2025 16:29	14,3	5,10	4,23
16	22/1/2025 16:30	11,8	4,89	3,88
17	22/1/2025 16:31	9,64	4,75	4,11
18	22/1/2025 16:32	10,1	5,02	4,22
19	22/1/2025 16:33	8,05	4,21	3,84
20	22/1/2025 16:34	7,65	4,09	2,56
21	22/1/2025 16:35	13,1	4,96	4,13
22	22/1/2025 16:36	12,8	5,04	3,85
23	22/1/2025 16:37	7,92	4,88	2,12
24	22/1/2025 16:38	9,56	4,77	3,79
25	22/1/2025 16:39	13,9	5,10	4,21
26	22/1/2025 16:40	12,3	5,09	4,18
27	22/1/2025 16:41	10,3	4,93	4,36
28	22/1/2025 16:42	14,1	5,02	4,01
29	22/1/2025 16:43	7,65	4,15	3,50
30	22/1/2025 16:44	8,91	4,52	3,39
31	22/1/2025 16:45	9,36	6,35	3,01
32	22/1/2025 16:46	7,06	4,36	2,70
33	22/1/2025 16:47	8,25	3,86	4,39
34	22/1/2025 16:48	7,29	5,21	2,08
35	22/1/2025 16:49	9,22	7,45	1,77

Equation 4 is used to calculate the average convergence time, which represents the total time it took the FortiGate equipment to detect the fault and the time it took to put the new learned default route into operation. For the calculation we used the average fault detection time and the average new route calculation time in the FortiGate 40F calculated through the tests shown in Table 4.

$$Tc = 4,70s + 3,76s \quad (4)$$

$$Tc = 8,46s$$

Tests were also performed to check convergence by disconnecting the WAN interface of the FortiGate 30E. An average failure detection time of 4,85 seconds was obtained, which represents the time it took the equipment to detect the interface down or without internet response, also an average time in the calculation of new routes of 5,02 seconds was obtained, which represents the time it took the equipment to calculate the new routing table.

**Table 4.** Tests conducted to verify convergence by disconnecting the WAN interface of the Fortigate 30E.

Test	Date	Tc (s)	Td (s)	Tr (s)
1	22/1/2025 16:42	9,96	4,82	5,14
2	22/1/2025 16:43	10,31	5,24	5,07
3	22/1/2025 16:44	9,63	4,52	5,11
4	22/1/2025 16:45	10,72	5,53	5,19
5	22/1/2025 16:46	9,61	4,62	4,99
6	22/1/2025 16:47	9,08	4,32	4,76
7	22/1/2025 16:48	9,38	4,21	5,17
8	22/1/2025 16:49	9,93	4,88	5,05
9	22/1/2025 16:50	10,03	4,77	5,26
10	22/1/2025 16:51	9,06	4,65	4,41
11	22/1/2025 16:52	9,85	4,91	4,94
12	22/1/2025 16:53	9,72	4,72	5,00
13	22/1/2025 16:54	10,12	5,20	4,92
14	22/1/2025 16:55	9,44	4,40	5,04
15	22/1/2025 16:56	10,05	4,90	5,15
16	22/1/2025 16:57	9,53	4,60	4,93
17	22/1/2025 16:58	10,28	5,11	5,17
18	22/1/2025 16:59	9,78	4,82	4,96
19	22/1/2025 17:00	9,91	4,88	5,03
20	22/1/2025 17:01	10,14	5,20	4,94
21	22/1/2025 17:02	9,65	4,60	5,05
22	22/1/2025 17:03	9,83	4,78	5,05
23	22/1/2025 17:04	10,02	4,98	5,04
24	22/1/2025 17:05	10,10	5,12	4,98
25	22/1/2025 17:06	9,71	4,69	5,02

26	22/1/2025 17:07	9,88	4,85	5,03
27	22/1/2025 17:08	10,20	5,15	5,05
28	22/1/2025 17:09	9,59	4,55	5,04
29	22/1/2025 17:10	10,11	5,10	5,01
30	22/1/2025 17:11	9,90	4,90	5,00
31	22/1/2025 17:12	9,87	4,88	4,99
32	22/1/2025 17:13	10,25	5,22	5,03
33	22/1/2025 17:14	9,80	4,80	5,00
34	22/1/2025 17:15	9,95	4,95	5,00
35	22/1/2025 17:16	10,05	5,00	5,05

The results indicate that the FortiGate 30E exhibits a slightly longer average convergence time of 9,87 seconds, compared to 8,46 seconds recorded for the FortiGate 40F. This difference, approximately 1,4 seconds, may be attributed to the hardware and processing improvements present in the more recent 40F model. It is important to highlight that these results reflect specific device behavior under controlled and repeatable test conditions, rather than a general rule applicable to all deployments. Table 4 presents the detailed timing data obtained from the convergence tests performed on the FortiGate 30E, following the same methodology used for the 40F.

### 3.2.Speed and percentage error results for fortigate 30E and 40F

We carried out several speed tests using the speedtest.net platform to measure how efficiently the FortiGate 40F used the available bandwidth on its WAN interface. As shown in Table 5, the device reached an average throughput of 931,60 Mbps out of a total capacity of 1.000 Mbps, which means it was using about 93,16% of the link. These tests were performed in the Network Laboratory, where the connection is limited to 1 Gbps. It is worth noting that these results come from a controlled lab environment, so they should be seen as an indicator of performance under these specific conditions, rather than as a direct measure of behavior in a real production network.

**Table 5.** Speed tests conducted using the speedtest.net platform.

Test	Date	Real usage (Mbps)	Total capacity (Mbps)	% bandwidth used
1	21/1/2025 15:21	933,10	1.000	93,3
2	21/1/2025 15:21	936,28	1.000	93,6
3	21/1/2025 15:22	939,75	1.000	94,0
4	21/1/2025 15:22	930,82	1.000	93,1
5	21/1/2025 15:23	933,30	1.000	93,3
6	21/1/2025 15:23	930,20	1.000	93,0
7	21/1/2025 15:24	926,53	1.000	92,7
8	21/1/2025 15:24	922,58	1.000	92,3

9	21/1/2025 15:25	928,24	1.000	92,8
10	21/1/2025 15:25	930,32	1.000	93,0
11	21/1/2025 15:26	934,12	1.000	93,4
12	21/1/2025 15:27	937,54	1.000	93,8
13	21/1/2025 15:28	932,15	1.000	93,2
14	21/1/2025 15:29	928,76	1.000	92,9
15	21/1/2025 15:30	931,23	1.000	93,1
16	21/1/2025 15:31	929,45	1.000	92,9
17	21/1/2025 15:32	925,33	1.000	92,5
18	21/1/2025 15:33	940,67	1.000	94,1
19	21/1/2025 15:34	927,12	1.000	92,7
20	21/1/2025 15:35	935,88	1.000	93,6
21	21/1/2025 15:36	933,45	1.000	93,3
22	21/1/2025 15:37	922,67	1.000	92,3
23	21/1/2025 15:38	938,01	1.000	93,8
24	21/1/2025 15:39	932,98	1.000	93,3
25	21/1/2025 15:40	927,34	1.000	92,7
26	21/1/2025 15:41	930,99	1.000	93,1
27	21/1/2025 15:42	924,77	1.000	92,5
28	21/1/2025 15:43	926,54	1.000	92,7
29	21/1/2025 15:44	939,88	1.000	94,0
30	21/1/2025 15:45	930,23	1.000	93,0
31	21/1/2025 15:46	933,77	1.000	93,4
32	21/1/2025 15:47	937,11	1.000	93,7
33	21/1/2025 15:48	928,66	1.000	92,9
34	21/1/2025 15:49	929,45	1.000	92,9
35	21/1/2025 15:50	936,89	1.000	93,7

Equation 5 is used to calculate the percentage of bandwidth that represents the average percentage of the real average use captured in the tests in Table 8, where the result was 93,16%, which for the schedule in which the tests were carried out is an optimal value, since it is almost close to the real capacity of 1.000 Mbps.

$$BW = \left( \frac{931.60}{1,000} \right) \times 100\% \quad (5)$$

$$BW = 93,16\%$$

Equation 6 is used to calculate the percentage error of the expected bandwidth, which represents the percentage error in the bandwidth using the real average use captured in the tests in Table 6. The result obtained is 6,84%, which is an optimal value, since it is far from the 100% error percentage.

$$Error\ rate = \left( \frac{|931.60 - 1,000|}{1,000} \right) \times 100$$

$$Error\ rate = \left( \frac{|- 68.4|}{1,000} \right) \times 100 \tag{6}$$

$$Error\ rate = 6.84\%$$

Later, we repeated the speed tests using the speedtest.net platform, but this time measuring the performance through the interface on the FortiGate 30E where OSPF was configured. As shown in Table 6, the results showed an average throughput of 916,40 Mbps, which corresponds to a 91,64% utilization of the available 1.000 Mbps bandwidth. These values reflect a slightly lower usage compared to the previous tests with the FortiGate 40F, which may be expected given the hardware differences between both devices.

**Table 6.** Speed tests conducted using the speedtest.net platform, through which the bandwidth calculation was performed via the OSPF configured on the Fortigate 40F.

Test	Date	Real usage (Mbps)	Total capacity (Mbps)	% bandwidth used
1	21/1/2025 16:00	916,92	1.000	91,7
2	21/1/2025 16:01	918,34	1.000	91,8
3	21/1/2025 16:02	914,62	1.000	91,5
4	21/1/2025 16:03	916,02	1.000	91,6
5	21/1/2025 16:04	916,1	1.000	91,6
6	21/1/2025 16:05	917,25	1.000	91,7
7	21/1/2025 16:06	914,16	1.000	91,4
8	21/1/2025 16:07	918,3	1.000	91,8
9	21/1/2025 16:08	916,2	1.000	91,6
10	21/1/2025 16:09	917,3	1.000	91,7
11	21/1/2025 16:10	914,54	1.000	91,5
12	21/1/2025 16:11	914,42	1.000	91,4
13	21/1/2025 16:12	918,25	1.000	91,8
14	21/1/2025 16:13	917,61	1.000	91,8
15	21/1/2025 16:14	914,36	1.000	91,4
16	21/1/2025 16:15	918,68	1.000	91,9
17	21/1/2025 16:16	918,38	1.000	91,8



18	21/1/2025 16:17	914,81	1.000	91,5
19	21/1/2025 16:18	917,22	1.000	91,7
20	21/1/2025 16:19	917,35	1.000	91,7
21	21/1/2025 16:20	914,52	1.000	91,5
22	21/1/2025 16:21	917,95	1.000	91,8
23	21/1/2025 16:22	915,95	1.000	91,6
24	21/1/2025 16:23	918,38	1.000	91,8
25	21/1/2025 16:24	916,67	1.000	91,7
26	21/1/2025 16:25	914,37	1.000	91,4
27	21/1/2025 16:26	916,43	1.000	91,6
28	21/1/2025 16:27	914,84	1.000	91,5
29	21/1/2025 16:28	916,97	1.000	91,7
30	21/1/2025 16:29	916,01	1.000	91,6
31	21/1/2025 16:30	915,73	1.000	91,6
32	21/1/2025 16:31	916,3	1.000	91,6
33	21/1/2025 16:32	915,02	1.000	91,5
34	21/1/2025 16:33	916,9	1.000	91,7
35	21/1/2025 16:34	917,16	1.000	91,7

Equation 7 is used to calculate the percentage of bandwidth using the actual average usage captured in the tests. The result was 91,64% which, considering that this is the backup link, is an optimal value compared to the 93,16% calculated with Table 6.

$$BW = \left( \frac{916,40}{1.000} \right) \times 100\% \quad (7)$$

$$BW = 91,64\%$$

Equation 8 is used to calculate the percentage error of the expected bandwidth, which represents the percentage of error in the bandwidth using the real average use captured in the tests. The result was 8,36%, which is an optimal value, considering that this is the backup link.

$$Error\ rate = \left( \frac{|916,40 - 1.000|}{1.000} \right) \times 100$$

$$Error\ rate = \left( \frac{|- 83,6|}{1.000} \right) \times 100 \quad (8)$$

$$Error\ rate = 8,36\%$$

We also ran speed tests using the speedtest.net platform on the WAN interface of the FortiGate 30E, but this time the measurements were taken between 6:20 p.m. and 6:41 p.m., right during peak hours when academic activity on campus was at its highest. As shown in Table 7, the available bandwidth during this time was noticeably lower compared to the earlier tests performed

with the FortiGate 40F. This drop in performance is likely due to the increased number of users and higher demand for internet traffic during that time slot.

**Table 7.** List of results obtained through speed tests using the WAN interface of the Fortigate 30E.

<b>Test</b>	<b>Date</b>	<b>Real capacity (Mbps)</b>	<b>Total capacity (Mbps)</b>	<b>% bandwidth used</b>
1	22/1/2025 18:20	790,30	1.000	79,0
2	22/1/2025 18:25	822,52	1.000	82,3
3	22/1/2025 18:26	934,73	1.000	93,5
4	22/1/2025 18:27	856,65	1.000	85,7
5	22/1/2025 18:27	887,56	1.000	88,8
6	22/1/2025 18:28	776,44	1.000	77,6
7	22/1/2025 18:28	796,91	1.000	79,7
8	22/1/2025 18:29	838,93	1.000	83,9
9	22/1/2025 18:30	818,18	1.000	81,8
10	22/1/2025 18:31	772,23	1.000	77,2
11	22/1/2025 18:31	837,28	1.000	83,7
12	22/1/2025 18:31	793,00	1.000	79,3
13	22/1/2025 18:32	844,86	1.000	84,5
14	22/1/2025 18:32	829,79	1.000	83,0
15	22/1/2025 18:33	780,62	1.000	78,1
16	22/1/2025 18:33	837,24	1.000	83,7
17	22/1/2025 18:34	841,54	1.000	84,2
18	22/1/2025 18:34	831,09	1.000	83,1
19	22/1/2025 18:34	818,36	1.000	81,8
20	22/1/2025 18:35	876,44	1.000	87,6
21	22/1/2025 18:35	831,34	1.000	83,1
22	22/1/2025 18:36	799,19	1.000	79,9
23	22/1/2025 18:36	804,26	1.000	80,4
24	22/1/2025 18:36	739,61	1.000	74,0
25	22/1/2025 18:37	927,34	1.000	92,7
26	22/1/2025 18:37	830,22	1.000	83,0
27	22/1/2025 18:37	789,15	1.000	78,9
28	22/1/2025 18:38	697,17	1.000	69,7

29	22/1/2025 18:38	913,61	1.000	91,4
30	22/1/2025 18:39	887,32	1.000	88,7
31	22/1/2025 18:39	862,92	1.000	86,3
32	22/1/2025 18:39	861,25	1.000	86,1
33	22/1/2025 18:40	822,51	1.000	82,3
34	22/1/2025 18:40	855,60	1.000	85,6
35	22/1/2025 18:41	887,94	1.000	88,8

Using Equation 9, we proceed to calculate the percentage of bandwidth using the real average use captured in the tests in Table 8. We obtain a percentage of bandwidth used of 83,13%, since, because of the schedule in which the tests were carried out, it is diminished by the arrival of students and teaching staff.

$$BW = \left( \frac{|831,26|}{1.000} \right) \times 100\% \quad (9)$$

$$BW = 83,13\%$$

Equation 10 is used to calculate the percentage error of the expected bandwidth using the real average use captured in the tests performed. The result is 13,80% error higher than that calculated in Table 8, because the higher the demand for Internet by students and teaching staff, the higher the error percentage will be. For example, in the case of performing a speed test and the channel is completely saturated, the test will show 0 Mbps or as a failed test, this would indicate an error percentage of 100%.

$$Error\ rate = \left( \frac{|831,26 - 1.000|}{1.000} \right) \times 100 \quad (10)$$

$$Error\ rate = \left( \frac{|-169,74|}{1.000} \right) \times 100$$

$$Error\ rate = 16,87\%$$

Afterward, we disconnected the WAN interface of the FortiGate 30E to test the behavior of the backup internet connection, which relies on the default route dynamically learned through the OSPF link with the FortiGate 40F. Once the failover occurred, the system continued operating through the backup route, and as shown in Table 8, we recorded an average throughput of 861,93 Mbps, corresponding to a bandwidth utilization of 86,2%. This result confirms that the OSPF-based failover mechanism worked as expected, maintaining stable network performance even after the primary connection was lost.

**Table 8.** List of results obtained from tests involving the disconnect of the WAN interface on the Fortigate 30E device.

Test	Date	Real usage (Mbps)	Total capacity (Mbps)	% bandwidth used
1	22/1/2025 18:42	862,18	1.000	86,2
2	23/1/2025 18:43	898,53	1.000	89,9
3	24/1/2025 18:43	877,11	1.000	87,7

4	25/1/2025 18:43	868,55	1.000	86,9
5	26/1/2025 18:44	905,16	1.000	90,5
6	27/1/2025 18:44	892,31	1.000	89,2
7	28/1/2025 18:45	899,35	1.000	89,9
8	29/1/2025 18:45	874,52	1.000	87,5
9	30/1/2025 18:45	907,95	1.000	90,8
10	31/1/2025 18:46	856,7	1.000	85,7
11	1/2/2025 18:46	886,1	1.000	88,6
12	2/2/2025 18:47	900,43	1.000	90,0
13	3/2/2025 18:48	838,91	1.000	83,9
14	4/2/2025 18:48	897,78	1.000	89,8
15	5/2/2025 18:48	869,18	1.000	86,9
16	6/2/2025 18:49	872,75	1.000	87,3
17	7/2/2025 18:50	811,83	1.000	81,2
18	8/2/2025 18:50	836,7	1.000	83,7
19	9/2/2025 18:50	848,63	1.000	84,9
20	10/2/2025 18:50	855,88	1.000	85,6
21	11/2/2025 18:51	875,19	1.000	87,5
22	12/2/2025 18:52	890,45	1.000	89,0
23	13/2/2025 18:52	875,71	1.000	87,6
24	14/2/2025 18:53	748,57	1.000	74,9
25	15/2/2025 18:53	894,18	1.000	89,4
26	16/2/2025 18:54	889,53	1.000	89,0
27	17/2/2025 18:54	894,52	1.000	89,5
28	18/2/2025 18:54	893,36	1.000	89,3
29	19/2/2025 18:55	877,94	1.000	87,8
30	20/2/2025 18:55	881,35	1.000	88,1
31	21/2/2025 18:56	811,97	1.000	81,2
32	22/2/2025 18:56	816,09	1.000	81,6
33	23/2/2025 18:57	770,01	1.000	77,0
34	24/2/2025 18:57	825,61	1.000	82,6
35	25/2/2025 18:57	762,56	1.000	76,3

Equation 11 is used to calculate the percentage of bandwidth using the actual average use captured in the tests performed. The percentage of bandwidth used was 86,19%, which, due to the timetable in which the tests were performed, was reduced by the arrival of students and teaching staff.

$$BW = \left( \frac{861,93}{1.000} \right) \times 100 \tag{11}$$

$$BW = 86,19\%$$

Similarly, by means of Equation 12, we proceed to calculate the percentage error of the expected bandwidth using the real average use captured in the tests. The result is 13,80% error, which is increased because, as there is more demand for Internet by students and teaching staff, the error percentage will also increase.

$$Error\ rate = \left( \frac{|861,93 - 1.000|}{1.000} \right) \times 100 \tag{12}$$

$$Error\ rate = \left( \frac{|- 138,07|}{1.000} \right) \times 100$$

$$Error\ rate = 13,80\%$$

Speed tests show that the FortiGate 40F leverages 93,1% to 94% of the available bandwidth (1.000 Mbps), thus confirming its efficiency in handling network traffic compared to the FortiGate 30E being an older system device.

### 3.3. Summary of test results

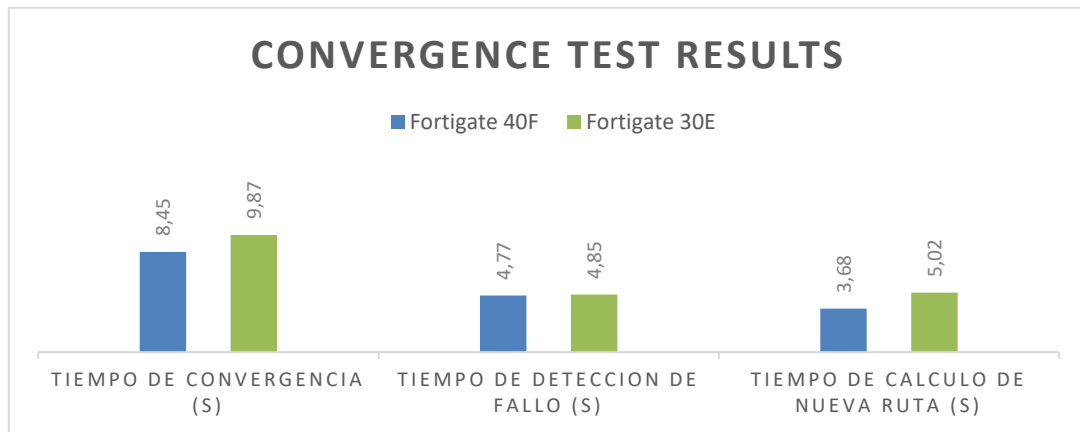
Similarly, we carried out average convergence time tests for both devices. The FortiGate 40F recorded an average convergence time of 8,45 seconds, while the FortiGate 30E showed a slightly higher average of 9,87 seconds. This difference of 1,42 seconds can be attributed to the fact that the 40F is a newer model, equipped with improved hardware and faster processing capabilities. As shown in Table 9, this advantage allows the 40F to detect and recover from routing changes more efficiently than the older 30E unit.

**Table 9.** Final data list obtained from convergence tests and error percentage conducted between the Fortigate 30E and 40F.

	<b>Convergence time (s)</b>	<b>Failure detection time (s)</b>	<b>New route calculation time (s)</b>
Fortigate 40F	8,45	4,77	3,68
Fortigate 30E	9,87	4,85	5,02

Figure 10 shows a bar chart detailing a summary of the results captured, showing a shorter convergence time in the FortiGate 40F. This is because this equipment is more modern and therefore has better processing time to calculate a new route compared to the FortiGate 30E.

Based on the speed tests carried out in the networking laboratory, we observed that the FortiGate 40F delivered better performance results during the testing window between 3:21 p.m. and 4:34 p.m., compared to the FortiGate 30E, which was evaluated later in the day, between 6:20 p.m. and 6:57 p.m.. The performance gap is largely explained by the higher network demand during the evening, when more users—such as students, instructors, and administrative staff—were actively using the campus network. Table 10 summarizes the comparative results between both devices under these different load conditions.

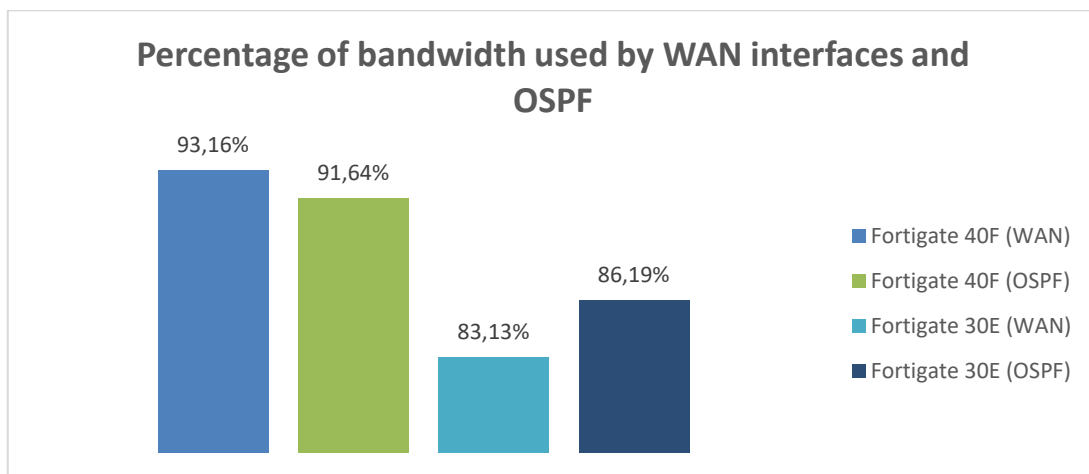


**Figure 10.** Results obtained on both Fortigate devices.

**Table 10.** Final data obtained because of speed tests conducted at different times between the FortiGate 30E and 40F devices.

	Date	Percentage of bandwidth used	Average transfer rate
Fortigate 40F (WAN)	15:21 - 15:50	93,16%	931,60 Mbps
Fortigate 40F (OSPF)	16:00 - 16:34	91,64%	916,40 Mbps
Fortigate 30E (WAN)	18:20 - 18:41	83,13%	831,26 Mbps
Fortigate 30E (OSPF)	18:42 - 18:57	86,19%	861,93 Mbps

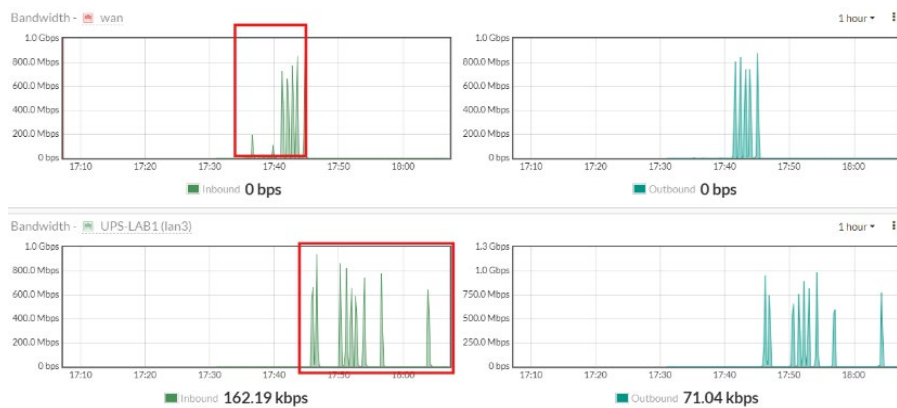
Figure 11 presents a bar chart summarizing the results obtained for both FortiGate devices using the WAN interface and the internal OSPF link interface. In this case, a performance decrease is observed in the tests conducted with the FortiGate 30E, as these were performed during peak internet usage hours due to the arrival of students, faculty, and administrative staff.



**Figure 11.** Summary of the percentage of bandwidth used.

Figure 12 shows the graphs extracted from the FortiGate 40F, where it can be observed that, after disconnecting the WAN interface, all traffic was lost and the LAN3 interface became active, showing an increase in traffic. This indicates that, upon detecting a failure in the primary internet connection, the backup internet link was activated.





**Figure 12.** Bandwidth consumption graphs showing internet convergence on the output with FortiGate 40F.

The table 11 presents the results of several tests performed on FortiGate 30E and 40F devices to measure how long they take to detect a failure. Three key pieces of data are shown: the average time in seconds recorded by each device, the range indicating the minimum and maximum values obtained, and the standard deviation, which reflects how consistent those times were between tests. The results show that the FortiGate 40F not only detected failures faster (3,2 seconds compared to 4,5 seconds for the 30E), but also performed more consistently. This allows the reader to understand at a glance that several measurements were taken and that basic statistical analysis was applied to support the study's conclusions.

In summary, the tests carried out provided valuable insights into how both FortiGate devices behave under simulated fault conditions and varying network loads. The FortiGate 40F consistently outperformed the 30E in terms of convergence time and bandwidth utilization, which is consistent with the improvements expected from newer-generation hardware. However, it's important to recognize that the FortiGate 30E, despite being an older model, still demonstrated reliable operation especially when configured properly within an OSPF-based redundancy scheme. These results confirm that a well-designed routing and monitoring setup, even in a controlled and virtualized environment, can ensure network continuity and responsiveness. The findings also reinforce the importance of considering factors such as test timing and user load when evaluating real-world performance.

**Table 11.** WAN disconnections for FortiGate 30E and 40F under controlled conditions.

	Average (s)	Range (s)	Standar desviation (s)
Fortigate 40F	3,2	2,9 – 3,7	0,2
Fortigate 30E	4,5	4,0 – 5,1	0,3

#### 4. DISCUSSION

The results obtained in this study clearly reflect how FortiGate 30E and 40F devices behave in a real, operational network environment, such as that of an educational institution. Unlike other studies that focus on very different environments such as satellite networks or algorithmic simulations, this study worked directly with real traffic, physical equipment, and common everyday situations, which gives these data greater practical relevance.

In terms of convergence times, it was observed that the FortiGate 40F reacted more quickly to the loss of connection on its WAN interface. The average time it took to detect failure and recalculate the route was 8,45 seconds, while for the 30E model this value was 9,87 seconds.

Although the difference is just over a second, in the continuous operation of a network that margin can mean the difference between an imperceptible transition and a noticeable interruption for the user.

This improved performance of the 40F was also reflected in the bandwidth tests. At times when the network was less congested, it managed to achieve 93,16% utilization of the available 1.000 Mbps, while the 30E, even operating as the main link, only averaged 83,13%. It is important to mention that the 30E tests were conducted during a time of higher traffic, which directly influences the results, but that does not detract from the fact that the more modern equipment demonstrated a greater ability to maintain a good quality of service.

Another important point was to verify that the switch to the backup route was performed correctly when the WAN was manually disconnected from the FortiGate 30E. At that point, the alternative route configured by OSPF with FortiGate 40F was activated without any problems. This is key because it demonstrates that the network has a functional high-availability configuration, something that many institutions seek to ensure that their services are not interrupted in the event of failures.

Comparing these results with those of other studies may be tempting, but it must be done with caution. For example, studies such as [24] and [25] present very different scenarios, where network conditions are not like those found in this type of environment. That is why we chose to focus on the specifics here: showing how these devices respond in real conditions, with changing traffic, active users, and devices working together.

In short, this study shows that [26], beyond the specific model, having a good configuration and monitoring in this case with OSPF and SNMP allows for maintaining an efficient and stable network. The FortiGate 40F, being a more modern device, offers better times and higher performance, but the 30E is still a valid option when it is well integrated and its capabilities are leveraged [27].

For future research, it would be interesting to see how these same devices perform in larger networks or with more demanding configurations, or even to analyze what improvements can be obtained with other protocols or monitoring tools. For now, the data obtained provides a solid foundation for those seeking to implement practical, accessible, and reliable solutions in corporate or academic networks.

## 5. CONCLUSIONS

The integration of the OSPF protocol with the SNMP monitoring system proved to be an efficient alternative for network supervision and management in controlled contexts. During tests carried out in a virtualized environment simulated using tools such as FortiGate and PRTG an average convergence time of 8,45 seconds was achieved, indicating a rapid response to connectivity failures or changes in the routing table. In addition, it was verified that critical event notification mechanisms, such as interface failure or internet channel saturation, were activated in a timely manner, facilitating a quick response to incidents.

It is important to note that the results presented do not come from a physical infrastructure, but from a virtualized laboratory designed to simulate real network conditions. This clarification is key to avoid extrapolating the results to production environments without considering the possible variations that physical equipment, uncontrolled traffic, and other factors could introduce. However, the methodology applied can serve as a reference for similar projects in educational or corporate networks, provided that the particularities of the environment are considered.

Likewise, some limitations were identified during the execution of the tests, such as restrictions on the network ports of the Optical Communications Laboratory, which prevented the

proper functioning of services such as SMTP or the reception of messages by Telegram. To continue with the tests, it was necessary to use a router configured in repeater mode and operating with mobile data. This experience highlights the importance of keeping the required ports available when evaluating routing protocols or network notification systems.

In future implementations, it is recommended to consider the use of more robust or specialized equipment, such as CISCO devices with EIGRP protocol, which could offer additional improvements in convergence times and fault detection. It is also suggested to explore alternative notification channels, such as SMS messages or alerts directed to groups in Microsoft Teams, which would contribute to diversifying the means of response and strengthening the ability to react to incidents.

Finally, to ensure proper monitoring of network events, it would be advisable to assign personnel responsible for fault analysis and incident documentation through the SNMP system, integrating tools such as PRTG with ticket management. This would allow for more detailed historical record keeping, facilitating statistical analysis of events and improving decision-making for preventive and corrective network maintenance.

## REFERENCES

- [1] V. Monita, R. Munadi, and I. D. Irawati, "A Quantum Key Distribution Network Routing Performance Based on Software-Defined Network," in *2023 IEEE 13th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, IEEE, Mar. 2023, pp. 1121–1125. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CCWC57344.2023.10099323>
- [2] S. Juneja, Arshdeep, S. Maiti, S. Raweri, B. S. Bhati, and H. Sharma, "Comprehensive Evaluation of Network Performance Monitoring Solutions," in *2024 International Conference on Intelligent Systems for Cybersecurity (ISCS)*, IEEE, May 2024, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ISCS61804.2024.10581356>
- [3] I. Shmelkin, and T. Springer, "On Adapting SNMP as Communication Protocol in Distributed Control Loops for Self-adaptive Systems," in *2021 IEEE International Conference on Autonomic Computing and Self-Organizing Systems (ACSOS)*, IEEE, Sep. 2021, pp. 61–70. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACSOS52086.2021.00022>
- [4] N. Rybowski, and O. Bonaventure, "Evaluating OSPF Convergence with ns-3 DCE," in *Proceedings of the 2022 Workshop on ns-3*, New York, NY, USA: ACM, Jun. 2022, pp. 120–126. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3532577.3532597>
- [5] R. I. Espinel Villalobos, E. Ardila Triana, H. Zarate Ceballos, and J. E. Ortiz Triviño, "Design and Implementation of Network Monitoring System for Campus Infrastructure Using Software Agents," *Ingeniería e Investigación*, vol. 42, no. 1, Jul. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v42n1.87564>
- [6] S. Suakanto, T. A. Nugroho, E. Nuryatno, T. W. Sen, and A. Z. Hafizhah, "On the Use of SNMP as a Protocol for Healthcare Asset Management in the Operation and Maintenance Cycle," in *2023 10th International Conference on ICT for Smart Society (ICISS)*, IEEE, Sep. 2023, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICISS59129.2023.10291423>
- [7] A. Makhdoomi, N. Jan, Palak, and N. Goel, "Conventional and next generation firewalls in network security and its applications," in *2022 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS)*, IEEE, Nov. 2022, pp. 964–969. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICCCIS56430.2022.10037674>

- [8] L. M. Silalahi, V. Amaada, S. Budiyanto, I. U. V. Simanjuntak, and A. D. Rochendi, "Implementation of auto failover on SD-WAN technology with BGP routing method on FortiGate routers at XYZ company," *International Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. 70, no. 1, pp. 5–11, Mar. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24425/ijet.2024.149540>
- [9] H. Santillan, J. A. Arévalo Satán, and P. Wong, "Un análisis integral de la infraestructura de ciberseguridad en ambientes académicos," *Ingeniería*, vol. 35, no. 1, pp. 11–23, Oct. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15517/ri.v35i1.60075>
- [10] J. Borthakur, "A comparison study of single area OSPF Network to multiple area OSPF Network implementation in a Campus area Network," in *2022 13th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, IEEE, Oct. 2022, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICCCNT54827.2022.9984627>
- [11] N. Miswar, H. Herman, and I. Riadi, "COMPARING THE PERFORMANCE OF OSPF AND OSPF-MPLS ROUTING PROTOCOL IN FORWARDING TCP AND UDP PACKET," *Jurnal Teknik Informatika (Jutif)*, vol. 4, no. 5, pp. 1237–1247, Nov. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.52436/1.jutif.2023.4.5.1456>
- [12] A. Fathima, and G. S. Devi, "Enhancing university network management and security: a real-time monitoring, visualization & cyber attack detection approach using Paessler PRTG and Sophos Firewall," *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, Aug. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s13198-024-02448-y>
- [13] D. Godfrey, B. Suh, B. H. Lim, K.-C. Lee, and K.-I. Kim, "An Energy-Efficient Routing Protocol with Reinforcement Learning in Software-Defined Wireless Sensor Networks," *Sensors*, vol. 23, no. 20, pp. 8435, Oct. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s23208435>
- [14] S. K. Ibrahim, and Z. T. Jebur, "Usage of OSPF Convention in System Designed in Republic of Iraq," *J Phys Conf Ser*, vol. 1804, no. 1, Feb. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1804/1/012118>
- [15] P. Roquero, and J. Aracil, "On Performance and Scalability of Cost-Effective SNMP Managers for Large-Scale Polling," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 7374–7383, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3049310>
- [16] T. Sachinidis, A. C. Politis, and C. S. Hilar, "To Split or not to Split? A Simulation Study on the Network Convergence Duration of Multi-Area OSPF," in *2023 46th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, IEEE, Jul. 2023, pp. 115–118. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TSP59544.2023.10197672>
- [17] S. Kontogiannis, A. Karakos, G. Kokkonis, and P. Kitsos, "Snm for Ethernet Networks SETH: A Network Benchmark Toolkit for Managing Routers Statistical Information," in *2011 15th Panhellenic Conference on Informatics*, IEEE, Sep. 2011, pp. 175–179. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/PCI.2011.3>
- [18] I. A. Supriyono, *et al.*, "Implementation of Wireless User Authentication using WLC-Forti Framework," *Aptisi Transactions on Technopreneurship (ATT)*, vol. 5, no. 2sp, pp. 234–242, Sep. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.34306/att.v5i2sp.346>

- [19] Amrizal *et al.*, “Training on the Use of GNS3 in Computer Networks Learning for Vocational High School Teachers,” *Indonesian Journal of Community Services Cel*, vol. 1, no. 3, pp. 151–160, Dec. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.70110/ijcsc.v1i3.20>
- [20] I. M. Nabil, A. R. Al Tahtawi, and Supriyanto, “Public Street Lighting Monitoring System Uses Telegram-Based Application Wireless Sensor Network,” *Jurnal Asimetrik: Jurnal Ilmiah Rekayasa & Inovasi*, vol. 6, no. 1, pp. 153–164, Jan. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.35814/asiimetrik.v6i1.5265>
- [21] B. Dordevic, V. Timcenko, O. Pavlovic, and N. Davidovic, “Performance comparison of native host and hyper-based virtualization VirtualBox,” in *2021 20th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, IEEE, Mar. 2021, pp. 1–4. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/INFOTEH51037.2021.9400684>
- [22] K. Shahid, S. N. Ahmad, and S. T. H. Rizvi, “Optimizing Network Performance: A Comparative Analysis of EIGRP, OSPF, and BGP in IPv6-Based Load-Sharing and Link-Failover Systems,” *Future Internet*, vol. 16, no. 9, pp. 339, Sep. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/fi16090339>
- [23] M. Munas, and K. C. Arun, “Performance Evaluation of Distance Vector (RIP) and Link-State (OSPF) Routing Protocols,” in *2023 International Conference on Integrated Intelligence and Communication Systems (ICIICS)*, IEEE, Nov. 2023, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICIICS59993.2023.10421146>
- [24] Y. Wang, W. Li, K. Zhao, and Y. Fang, “An Improved Version of the OSPF Routing Protocol Designed for Large-Scale Polar Orbit Constellations,” in *2023 IEEE 23rd International Conference on Communication Technology (ICCT)*, IEEE, Oct. 2023, pp. 1159–1164. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICCT59356.2023.10419444>
- [25] C. Pan, H. Lu, H. Shi, Y. Wang, and L. Qin, “Inverse Coupled Simulated Annealing for Enhanced OSPF Convergence in IoT Networks,” *Electronics*, vol. 13, no. 22, Nov. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics13224332>
- [26] M. Taruk, E. Budiman, R. Wardhana, H. J. Setyadi, G. M. Putra, and E. Maria, “Network Traffic WLAN Monitoring based SNMP using MRTG with Erlang Theory,” in *2021 3rd East Indonesia Conference on Computer and Information Technology (EIconCIT)*, IEEE, Apr. 2021, pp. 391–394. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/EIconCIT50028.2021.9431898>
- [27] M. F. Irawan, M. A. Nugroho, and I. Asror, “Comparative Analysis Performance of Dynamic Routing OSPF and Segment Routing,” in *2024 12th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)*, IEEE, Aug. 2024, pp. 93–100. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICoICT61617.2024.10698049>



# Evaluación del efecto de la duración del sismo en la respuesta estructural de un sistema SDOF

## *(Evaluation of the Effect of Earthquake Duration on the Structural Response of an SDOF System)*

Hugo Julianny Latorre Aizaga, Jonás Víctor Molina Pastáz, Brandon Ademir Arguello Molina, Félix Ronaldo Cunduri Cunduri  
Universidad Central del Ecuador-UCE, Quito, Ecuador  
[hjlatorre@uce.edu.ec](mailto:hjlatorre@uce.edu.ec), [jvmolinap@uce.edu.ec](mailto:jvmolinap@uce.edu.ec), [baarguello@uce.edu.ec](mailto:baarguello@uce.edu.ec), [frcunduri@uce.edu.ec](mailto:frcunduri@uce.edu.ec)

**Resumen:** El presente trabajo analiza el efecto de la duración de un sismo sobre la respuesta dinámica de sistemas estructurales idealizados de un solo grado de libertad (SDOF). La investigación surge de la necesidad de considerar parámetros adicionales a la aceleración máxima (PGA) para evaluar con mayor precisión el comportamiento estructural. Para ello, se empleó un modelo lineal con amortiguamiento viscoso y se utilizaron registros sísmicos reales escalados con igual PGA, pero con duraciones de 5, 10 y 20 segundos. La respuesta dinámica se obtuvo mediante el método numérico de *Newmark*, evaluando el desplazamiento relativo máximo. Los resultados muestran una tendencia creciente del desplazamiento a medida que aumenta la duración del evento sísmico, lo que evidencia una mayor acumulación de energía y deformación. El aporte principal de este estudio radica en destacar la duración significativa del sismo como un parámetro relevante, incluso en etapas de diseño iniciales, proponiendo su inclusión en análisis sísmicos estructurales para mejorar la precisión y seguridad de los diseños.

**Palabras clave:** Análisis dinámico, desplazamiento máximo, duración sísmica, método de *Newmark*, PGA.

**Abstract:** This study analyzes the effect of earthquake duration on the dynamic response of idealized single-degree-of-freedom (SDOF) structural systems. The research arises from the need to consider additional parameters beyond peak ground acceleration (PGA) to more accurately evaluate structural behavior. A linear model with viscous damping was used, and real earthquake records scaled to the same PGA but with durations of 5, 10, and 20 seconds were applied. The dynamic response was obtained using the *Newmark* numerical method, focusing on the maximum relative displacement. The results show a growing trend in displacement as the duration of the seismic event increases, evidencing greater energy accumulation and deformation. The main contribution of this study lies in highlighting the significance of earthquake duration as a relevant parameter, even in early design stages, proposing its inclusion in structural seismic analysis to improve design accuracy and safety.

**Keywords:** Dynamic analysis, maximum displacement, seismic duration, newmark method, PGA.



## 1. INTRODUCCIÓN

En el análisis sismorresistente, uno de los parámetros más importantes al caracterizar un sismo es la aceleración máxima del suelo o PGA (*Peak Ground Acceleration*), comúnmente usada para describir la severidad del evento sísmico. Por medio de varios estudios se ha llegado a demostrar que, si la duración del sismo fuerte es alta, podrían influir significativamente en la respuesta dinámica de las estructuras [1]. La influencia podría ser mejor observada en sistemas de un grado de libertad (SDOF), donde la acción de una excitación prolongada puede generar respuestas mayores debido a la acumulación de deformaciones [2].

El tiempo ya ha sido estudiado en trabajos anteriores como menciona Hancock y Bommer [1], que plantearon definirla como un intervalo durante el cual se acumula un cierto porcentaje de energía total del movimiento sísmico. Luego de varios estudios posteriores, se ha demostrado que, aun cuando dos registros sísmicos logren tener la misma aceleración máxima, sus efectos pueden diferir considerablemente si la duración del movimiento varía [3]. En general, se observa que los registros de larga duración pueden generar varios ciclos de carga y que las deformaciones relativas se amplifican.

En Ecuador, donde los registros sísmicos presentan variabilidad considerable al ser producidos por diferentes fuentes, en cuanto a duración, este factor cobra especial importancia para una evaluación más exacta del comportamiento estructural. El presente estudio tiene como objetivo analizar la influencia de la duración del sismo sobre la respuesta dinámica de un sistema SDOF lineal, considerando desplazamiento relativo máximo como parámetro de comparación clave.

## 2. TRABAJO RELACIONADO

La influencia de la duración de los eventos sísmicos ha cobrado gran relevancia en los últimos años; se han realizado diversos estudios que detallan la alta influencia de la duración del sismo. Desde hace tiempo atrás, el diseño estructural se ha basado en parámetros como la aceleración espectral máxima o el periodo fundamental; sin embargo, esto deja de lado la duración del movimiento fuerte, que puede ser determinante en el comportamiento inelástico de las estructuras.

Varias investigaciones han evidenciado que incluso bajo espectros de diseño equivalentes los registros sísmicos con mayor duración y alta intensidad tienden a producir desplazamientos plásticos superiores y mayor energía histórica disipada. Carrasco [4] documentó que registros más prolongados incrementan significativamente la demanda inelástica, aumentando la ductilidad requerida y el daño acumulado. Algo semejante ocurre con Alva [5] que en su investigación concluye que la duración del pulso sísmico influye directamente en la probabilidad de colapso, aun cuando la intensidad espectral sea controlada.

La duración significativa se define como el intervalo entre el 5 % y el 95 % de la acumulación de la intensidad de Arias, esto representa la fase energética más relevante del sismo [6]. Este término, propuesto por el ingeniero chileno Arturo Arias, ha sido aplicado en estudios recientes para distinguir registros de corta y larga duración, revelando diferencias sustanciales en la respuesta de sistemas tipo SDOF.

El Eurocódigo 8 [7], y normas como FEMA-356 [8], no contemplan explícitamente la duración como criterio de selección de registros, lo cual limita la precisión de los análisis dinámicos no lineales. En ese contexto, autores como López *et al.* [9] y Vásconez *et al.* [10] han señalado la necesidad de enriquecer los modelos de análisis con factores que representen mejor las características reales del sismo.

Métodos como *Newmark- $\beta$*  estudiados en libros de análisis estructural utilizados para integrar la ecuación de movimiento de un sistema SDOF, permiten simular con precisión la respuesta estructural frente a acelerogramas reales [11]. Esta metodología ha sido esencial para verificar

cómo la duración prolongada del sismo se traduce en más ciclos de histéresis con mayor remanencia de desplazamiento y fatiga acumulada, especialmente en materiales dúctiles o estructuras con articulaciones plásticas.

Estudios recientes como el de Pawirodikromo [12] han demostrado que la duración significativa (D595) tiene una correlación directa con medidas de intensidad sísmica y con la respuesta inelástica de estructuras de concreto reforzado. Se evidencia que una mayor duración del movimiento genera una acumulación de energía más extensa y mayores niveles de daño, aun con la misma PGA.

Asimismo, Alva [5] analizó cómo la duración y el contenido energético del movimiento sísmico afectan estructuras tipo SDOF con comportamiento no lineal. Su trabajo concluye que registros de larga duración generan incrementos notables en la demanda de ductilidad, y que ignorar este parámetro puede subestimar la vulnerabilidad estructural frente a sismos prolongados.

### 3. METODOLOGÍA

La investigación evaluó la influencia de extender el tiempo de duración del registro sísmico en la respuesta dinámica de un sistema idealizado SDOF mediante simulaciones numéricas. La aceleración máxima del suelo es el factor que se pretende asumir como constante y únicamente la duración del sismo es el componente que se va a modificar. Para ejecutar el análisis se siguió el siguiente orden:

1. Definir el modelo matemático de un sistema de un grado de libertad lineal con amortiguamiento viscoso; es decir, que el mismo pueda oscilar en una sola dirección debido a una fuerza externa (sismo).
2. Al registro base se lo debe escalar y recortar, de manera que la aceleración máxima sea la misma, se deberán recortar tres segmentos de 5, 10 y 20 segundos, seleccionados de la parte central del registro donde están concentradas las aceleraciones con mayor incidencia.
3. Por medio del método de *Newmark* se encuentra la solución numérica del sistema. Los parámetros para aplicar el método son  $\beta = 1/4$  y  $\gamma = 1/2$  de tal forma que garanticen que el sistema se comporte de forma lineal.
4. Para cada caso se registra la historia de desplazamientos  $u(t)$  y se identifica el valor máximo alcanzado.
5. Comparar los desplazamientos encontrados en todos los casos y analizar la tendencia y el impacto de este parámetro en la estructura.

El estudio se desarrolla con base en un modelo elaborado y analizado mediante el lenguaje de programación Matlab, utilizando tanto para operaciones numéricas y visualización de los resultados. El registro base fue obtenido del portal USGS, que corresponde a un evento real con una aceleración máxima de aproximadamente 0,35 g el mismo que fue recortado de manera apropiada y manteniendo su amplitud.

En cuanto al modelo de un grado de libertad se usaron los siguientes parámetros para el análisis:

- Masa:  $m = 1 \text{ kg}$
- Frecuencia:  $f = 1,0 \text{ Hz}$
- Amortiguamiento crítico:  $\xi = 5\%$
- Condiciones iniciales:  $u(0) = 0, \dot{u}(0) = 0$

El registro sísmico base utilizado en la investigación corresponde al evento ocurrido en Chile en 1985, registrado por la estación Pacoima Dam. Se eligió este registro por su alto temporal. El tiempo de duración total fue de más de 20 segundos y su pulso estuvo bien definido, lo que permite idealizarlo como un candidato apropiado al analizar la respuesta dinámica. La aceleración máxima

fue de aproximadamente 0,35 g. De acuerdo con Hancock y Bommer [1], los registros con duración significativa y contenido energético concentrado en un intervalo definido permiten una evaluación más precisa de los efectos del componente temporal sobre la demanda estructural.

De igual manera, Bommer *et al.* [1] destacan que la presencia de un pulso claro en el movimiento del terreno facilita la interpretación de la respuesta dinámica, al reducir la influencia de frecuencias dispersas en el análisis. Además, la aceleración máxima del terreno, de aproximadamente 0,35 g, se mantuvo constante en todas las simulaciones, con el fin de aislar el efecto de la duración. Este procedimiento se encuentra respaldado por Chandramohan *et al.* [2], quienes establecen que el uso de registros espectralmente equivalentes o normalizados en términos de PGA permite analizar de forma independiente la influencia de la duración sísmica sobre la respuesta estructural.

En esta investigación, se analiza cómo la duración del registro sísmico afecta la respuesta dinámica máxima de un sistema idealizado de un SDOF. El PGA se mantiene constante, mientras que solo se modifica la duración de la ventana de excitación. El objetivo es estudiar la acumulación de energía y su impacto en el desplazamiento relativo máximo [14].

El sistema se representa como un oscilador lineal de un grado de libertad con un amortiguamiento viscoso clásico. Los parámetros que se utilizan son: masa, frecuencia y un amortiguamiento crítico del 5 %. Las condiciones iniciales se establecen en reposo y la integración temporal se lleva a cabo utilizando el método *Newmark*, lo que garantiza estabilidad incondicional y es ampliamente utilizado en estudios de respuesta dinámica lineal. Se establece un paso temporal o de acuerdo con la frecuencia de muestreo del acelerograma [15].

El registro base se refiere al movimiento capturado en la estación Pacoima Dam, un evento de gran relevancia histórica que presenta un pulso bien definido. El registro original fue filtrado para eliminar el ruido y se convirtió a unidades del Sistema Internacional ( $m/s^2$ ). Luego, se ajustó el registro para que la PGA de cada subregistro fuera de 0,35 g, asegurando que la comparación entre las diferentes duraciones se realice con el mismo valor pico de aceleración. Se extrajeron tres ventanas centradas en la parte del registro con mayor actividad y energía, con duraciones netas de 5, 10 y 20 segundos. Esta selección (corto, medio y largo) se realizó para abarcar rangos [16], [17].

Para cada segmento de 5, 10 y 20 segundos, se calcularon varios indicadores que nos ayudan a cuantificar la energía impartida y la duración efectiva. Estos incluyen la Intensidad de Arias (Ia), la Velocidad Absoluta Acumulativa (CAV) y la duración significativa, siguiendo definiciones estándar. Al incluir estos índices, podemos demostrar que, incluso manteniendo constante la PGA, la energía acumulada y la duración efectiva varían entre los recortes, y son en gran medida responsables de las diferencias en las demandas de desplazamiento que hemos observado [18]. Estudios recientes indican que Ia y CAV tienen una mejor correlación con los desplazamientos acumulados y los daños que la PGA por sí sola [19].

Para cada recorte, se integra la ecuación de movimiento utilizando el método de *y*, lo que nos permite obtener la historia temporal del desplazamiento. Los resultados principales que se registran son: (i) el desplazamiento máximo absoluto; (ii) la energía de deformación acumulada; (iii) el número de ciclos significativos y la evolución de la energía a lo largo del tiempo. Además, se generan espectros de respuesta (pseudo - aceleración y desplazamiento) para comparar cómo la duración influye en la demanda espectral efectiva [20].

Para poder separar los efectos de la duración y la energía total, se llevan a cabo las siguientes pruebas complementarias: (1) Familia PGA-igual: se mantiene la PGA constante (0,35 g) y se comparan los segmentos de 5, 10 y 20 segundos (procedimiento principal). (2) Familia Ia-igual: se escalan los recortes de manera alternativa para igualar la Ia entre las ventanas y así comparar las respuestas. Esta comparación nos ayuda a identificar si las diferencias observadas en relación

a la duración provienen de una mayor energía integrada o de la persistencia temporal del movimiento. Estudios recientes sugieren que este tipo de comparaciones son útiles para reducir sesgos que pueden surgir del simple escalado en la PGA [16], [18].

Además, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad variando el periodo estructural (por ejemplo, 0,5, 1 y 2 Hz) y el amortiguamiento (2 %, 5 %, 10 %) para determinar en qué condiciones la duración tiene un mayor impacto. La literatura sugiere que los sistemas con periodos largos y bajo amortiguamiento son más sensibles [21]. Para aumentar la validez de los resultados, se aconsejó repetir el procedimiento utilizando varios registros representativos, como aquellos con y sin componente pulsada.

Es importante reconocer que la selección y el escalado de registros pueden introducir incertidumbre. Por eso, se documentan de manera detallada los procedimientos de corte, filtrado y escalado, siguiendo las mejores prácticas descritas en revisiones recientes [14]. También se menciona la limitación de utilizar un modelo SDOF lineal ya que, en estructuras no lineales, la acumulación por duración puede comportarse de manera diferente, lo que justifica investigaciones futuras que incluyan MDOF y comportamiento inelástico. Finalmente, se explica claramente cómo se calculó cada índice (fórmulas y parámetros) y se incluye la implementación en Matlab para facilitar la reproducibilidad.

#### 4. RESULTADOS

El modelo desarrollado aplicando el método de *Newmark* a un sistema SDOF sometido a registros sísmicos con diferente duración, pero a la vez con el misma PGA, ha permitido analizar de qué manera la duración de un movimiento sísmico puede afectar la respuesta dinámica estructural del sistema. Esto pone en evidencia que las simulaciones realizadas para el aumento del tiempo con el mismo registro sísmico, tiende a acumular un mayor de ciclos de carga y descarga variando el tiempo de duración, lo que se traduce en incrementos graduales en la historia de desplazamientos. Aunque estos incrementos en los desplazamientos no se manifiestan de manera proporcional a la duración, pero sí se logra evidenciar una respuesta más sostenida en el tiempo, con mayores amplitudes en ciclos intermedios.

##### Registro sísmico escalado

El registro sísmico utilizado para el estudio corresponde al sismo de Chile de 1985, con una duración mayor a 60 segundos (ver Figura 1). Para asegurar que la única variable modificada durante el desarrollo de este estudio sea solo la duración del evento, se escaló el registro para alcanzar una aceleración máxima aproximadamente de 0,35g.

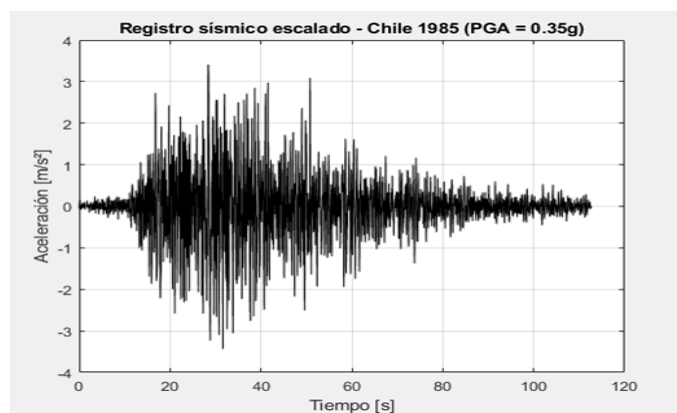
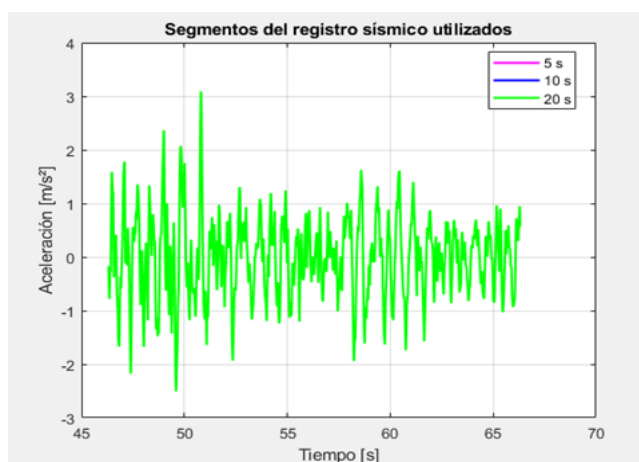


Figura 1. Registro sísmico escalado, sismo de Chile (1985).

## Segmentos de análisis

Con la finalidad de capturar el contenido dinámico más representativo del evento se extrajeron tres segmentos de análisis del registro de 5, 10 y 20 segundos de duración alrededor del tramo en el que se produce la mayor energía. Los tramos seleccionados se representan en la Figura 2.



**Figura 2.** Segmentos del registro sísmico para análisis de 5, 10 y 20 segundos.

## Respuesta dinámica del sistema

El sistema SDOF se analizó empleando el método de *Newmark*, bajo condiciones iniciales nulas y para garantizar el comportamiento lineal del sistema, se utilizó los parámetros de  $\beta = \frac{1}{4}$  y  $\gamma = \frac{1}{2}$ , los cuales nos aseguran estabilidad incondicional y precisión para sistemas lineales, sometidos a aceleraciones dinámicas. Los demás valores asumidos en el modelo son los siguientes: masa de 1 kg, frecuencia de 1 Hz, amortiguamiento crítico del 5% los cuales son valores muy representativos para un sistema estructural flexible con disipación moderada.

De acuerdo con Bommer *et al.* [1] y Pawirodikromo [12], mantener constante la intensidad pico del movimiento es fundamental para aislar el efecto del componente temporal, evitando que las diferencias en la respuesta provengan de variaciones en la amplitud o en el contenido espectral del registro. Así, la variable independiente principal en este estudio fue la duración significativa del sismo, mientras que la variable dependiente fue la respuesta dinámica estructural medida en términos de desplazamiento, velocidad y aceleración.

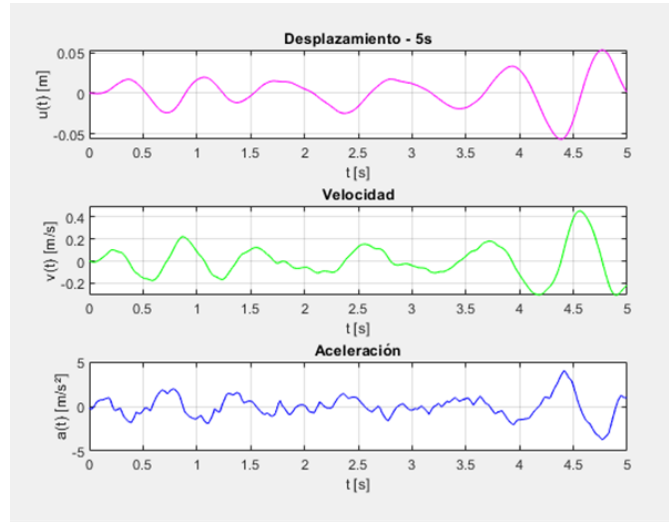
A partir de los tres registros analizados con duraciones de 5, 10 y 20 segundos respectivamente se obtuvieron las historias de desplazamiento, velocidad y aceleración para cada duración establecida.

### Duración de 5 segundos

La Figura 3 muestra que las oscilaciones que se presentan en la respuesta del sistema frente a una excitación sísmica de 5 segundos son relativamente moderadas. La velocidad y aceleración muestran picos ajustados con los ciclos de mayor excitación, lo que conlleva a una disipación de energía rápida debido a la corta duración del evento. A su vez, el desplazamiento máximo es cercano a 0,055m. Se refleja un sistema que no alcanza niveles críticos de deformación, evidenciándose una acumulación de energía escasa en eventos sísmicos de corta duración.

Este comportamiento coincide con lo reportado por Hancock y Bommer [1], quienes señalan que, para excitaciones de corta duración, la demanda estructural tiende a concentrarse en un número reducido de ciclos, generando respuestas de alta intensidad momentánea, pero con bajo potencial de daño acumulativo. De manera similar, los estudios experimentales de Carrasco *et al.* [4] y Alva *et al.* [5] demostraron que movimientos de corta duración con la misma intensidad pico

producen menores índices de energía de Arias y, por tanto, una disipación más rápida, asociada a una respuesta estructural menos exigente. Bommer *et al.* [1] y Pawirodikromo [12] destacan precisamente que, en escenarios donde el contenido energético del sismo se libera en intervalos cortos, los efectos inerciales dominan sobre los acumulativos, lo que se traduce en una respuesta transitoria y de baja persistencia.

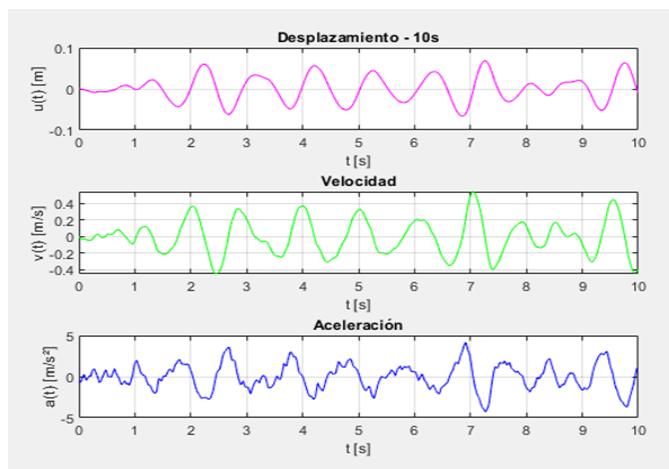


**Figura 3.** Historia de desplazamiento, velocidad y aceleración para 5 segundos.

#### Duración de 10 segundos

La Figura 4 revela un incremento en la cantidad de ciclos de vibración, alcanzando un desplazamiento máximo aproximado de 0,068 m representa un incremento cercano al 20 % respecto al caso de 5 segundos, evidenciando que la prolongación del evento produce una mayor acumulación de energía cinética y potencial antes de alcanzar el equilibrio.

La curva de velocidad muestra un comportamiento oscilatorio más constante y simétrico, reflejando que el sistema permanece activo durante un intervalo de excitación más extenso. Por su parte, la aceleración presenta una mayor densidad de picos distribuidos a lo largo de la duración total del sismo, lo cual se traduce en una secuencia de impactos energéticos que prolongan la respuesta estructural y exigen una disipación continua de energía a través del amortiguamiento. Este efecto acumulativo confirma que, aunque la amplitud de la excitación no se incrementa, la persistencia temporal amplifica las demandas internas del sistema.



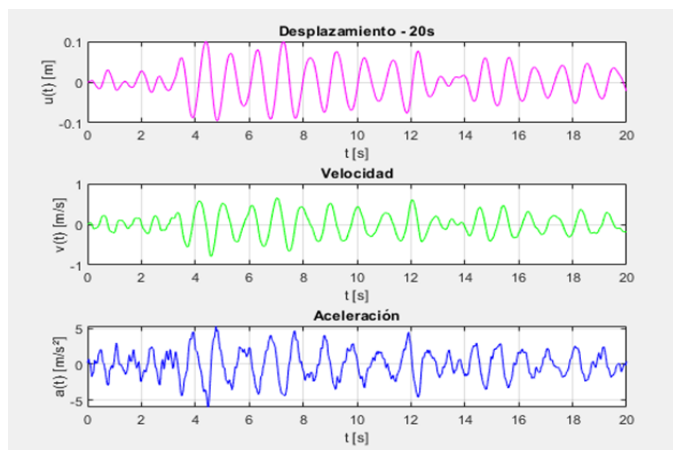
**Figura 4.** Historia de desplazamiento, velocidad y aceleración para 10 segundos.

El comportamiento observado también se encuentra alineado con lo planteado por Chandramohan *et al.* [2], quienes identificaron que, para sistemas con la misma intensidad espectral pero diferente duración, la respuesta estructural experimenta una reducción de la capacidad de colapso equivalente a un incremento en la energía de entrada. En el presente estudio, aunque el modelo es estrictamente lineal y no presenta degradación, el aumento del desplazamiento máximo y la densidad de aceleraciones sugieren una acumulación progresiva de energía que, en estructuras reales, podría traducirse en mayor daño por fatiga o demanda inelástica acumulativa.

### Duración de 20 segundos

La Figura 5 presenta una respuesta más intensa que las anteriores, ya que el registro de desplazamiento muestra oscilaciones extensas y de mayor intensidad con un desplazamiento máximo de 0,0996 m valor que representa un incremento significativo respecto a los casos de 5 segundos y 10 segundos, lo que indica una acumulación considerable de energía. La curva de velocidad evidencia una mayor cantidad de oscilaciones y la aceleración una excitación prolongada durante un número más amplio de periodos. Este comportamiento indica que el sistema debe recurrir de forma más sostenida a su capacidad de amortiguamiento para disipar la energía introducida, evidenciándose que una prolongada duración del sismo puede provocar que el sistema enfrente condiciones dinámicas más rigurosas, incluso bajo la misma aceleración máxima.

En consecuencia, el registro de 20 segundos evidencia un sistema que enfrenta condiciones dinámicas más rigurosas, con una demanda energética sostenida que podría comprometer la seguridad estructural si existieran no linealidades o mecanismos de fatiga. De acuerdo con las observaciones de Bommer *et al.* [1] y Pawirodikromo [12], este tipo de comportamiento es característico de movimientos sísmicos de larga duración, en los cuales la energía liberada durante un número elevado de ciclos provoca una acumulación progresiva de daño o disipación.



**Figura 5.** Historia de desplazamiento, velocidad y aceleración para 20 segundos.

### Comparación del desplazamiento máximo

Los desplazamientos máximos registrados en cada caso se encuentran compilados en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Desplazamientos máximos.

Duración del sismo (s)	Desplazamiento máximo (m)
5	0,0565
10	0,0683
20	0,0996



Al analizar los resultados obtenidos en la Tabla 1 se observa que el desplazamiento máximo presenta una tendencia creciente con respecto a la duración del sismo, un comportamiento que se puede justificar ya que la cantidad de energía que se transmite al sistema será mayor para un tiempo más prolongado de excitación sísmica, a pesar de poseer una intensidad igual, lo que conlleva a deformaciones más significativas.

Este estudio resalta la importancia de considerar el efecto que produce la duración más prolongada del evento sísmico sobre las estructuras, además de considerarlo como un parámetro fundamental en el análisis sísmico.

## 5. DISCUSIÓN

Los resultados de esta investigación evidencian que, a pesar de mantener constante el PGA, la duración del registro sísmico influye significativamente en la respuesta dinámica de un sistema SDOF. A medida que aumenta la duración del sismo, se incrementa el desplazamiento relativo máximo del sistema. Esto valida la afirmación planteada al inicio, según la cual una excitación prolongada genera respuestas mayores debido a la acumulación de deformaciones.

Este comportamiento es coherente respecto a las diferentes investigaciones, evidenciándose una notable convergencia entre ellas. El trabajo de Chandramohan *et al.* [2] estableció que la duración afecta sustancialmente la capacidad de colapso estructural mediante análisis con registros espectralmente equivalentes, mientras que Bravo *et al.* [22] documentaron aumentos significativos en la demanda de desplazamiento para sistemas SDOF bajo sismos de larga duración. Esta coherencia entre estudios independientes refuerza la necesidad de considerar la duración como parámetro fundamental en la evaluación sísmica.

La extensión de estos principios a sistemas lineales representa una contribución significativa, ya que investigaciones como las de Carrasco [4] y Alva [5] se habían centrado predominantemente en el comportamiento inelástico, lo cual demuestra que el efecto de la duración es crítico incluso en las primeras etapas de diseño donde predominan los modelos lineales.

En el ámbito metodológico, la elección del esquema de integración temporal merece especial consideración, dado que el método de *Newmark* ( $\gamma = 1/2$ ,  $\beta = 1/4$ ) implementado ha demostrado ser adecuado para capturar los efectos asociados a la duración sísmica en sistemas lineales. Si bien estudios comparativos, como el realizado por Alva [5] mediante el método de diferencias centrales, también reportan variaciones significativas en la demanda con registros de larga duración, investigaciones como la de Dhadse *et al.* [23] contribuyen desde el ámbito del modelado numérico al resaltar la importancia de formular estrategias computacionales consistentes y precisas en análisis estructurales, validando así la robustez de las conclusiones.

Las limitaciones reconocidas, particularmente en este estudio son: Primero que el modelo empleado es un sistema idealizado SDOF con comportamiento lineal, lo que no refleja completamente la complejidad de las estructuras reales, que tienen múltiples grados de libertad y pueden mostrar respuestas no lineales. Segundo, el uso de un único registro sísmico limita la generalización de los resultados, ya que no se considera la variabilidad entre diferentes eventos sísmicos o las características del suelo. Finalmente, el análisis no incluye un estudio paramétrico de otros factores, como la frecuencia natural del sistema o diferentes niveles de amortiguamiento, los cuales podrían tener un efecto combinado con la duración del evento. En este caso resulta prioritario extender este enfoque a modelos no lineales que incorporen criterios de daño acumulado, donde la duración sísmica podría revelar efectos aún más significativos.

## 6. CONCLUSIONES

La investigación demuestra que la duración del movimiento sísmico afecta de forma notable la respuesta estructural, aun con la misma intensidad (PGA). El estudio realizado en un sistema SDOF lineal, establece una base sólida para extender el análisis a modelos no lineales, a estructuras con varios grados de libertad y a diversas condiciones de amortiguamiento. Incluir estos factores permitirá precisar los efectos acumulativos de sismos prolongados y su vínculo con el daño real.

La duración influye no solo en el valor máximo de desplazamiento, sino también en la evolución temporal del daño. El aumento progresivo del desplazamiento en intervalos de 5, 10 y 20 segundos indica que la fatiga y el sobreesfuerzo pueden acumularse, aunque la PGA inicial se mantenga constante. Este resultado respalda la necesidad de considerar la duración como parámetro de diseño, sobre todo en zonas de alta sismicidad expuestas a eventos largos.

El uso del método de *Newmark* con registros escalados evidencia que los sismos prolongados modifican el instante y la magnitud del desplazamiento máximo. Por ello, el análisis temporal detallado es imprescindible desde las primeras fases de diseño. Se recomienda que la “duración significativa” se incorpore como requisito mínimo en las normativas de análisis dinámico.

Se sugiere complementar futuros estudios con modelos tridimensionales y criterios de daño basados en energía. Estas ampliaciones permitirán correlacionar la duración con los niveles de desempeño exigidos por los estándares de diseño basados en desempeño y afinar las estrategias de mitigación sísmica.

## REFERENCIAS

- [1] J. Hancock, y J. J. Bommer, “A state-of-knowledge review of the influence of strong-motion duration on structural damage”, *Earthquake Spectra*, vol. 22, no. 3, pp. 827–845, Aug. 2006. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1193/1.2220576>
- [2] R. Chandramohan, J. W. Baker, y G. G. Deierlein, “Quantifying the influence of ground motion duration on structural collapse capacity using spectrally equivalent records”, *Earthquake Spectra*, vol. 32, no. 2, pp. 927–950, May 2016. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1193/122813eqs298mr2>
- [3] J. J. Kempton, y J. P. Stewart, “Prediction Equations for Significant Duration of Earthquake Ground Motions considering Site and Near-Source Effects”, *Earthquake Spectra*, vol. 22, no. 4, pp. 985–1013, Nov. 2006. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1193/1.2358175>
- [4] F. Carrasco, E. Behrens, y C. Oyarzo, “Efectos de la duración de los terremotos en la respuesta inelástica de las estructuras”, en *XII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Santiago, Chile, 2010. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/259800994\\_Efectos\\_de\\_la\\_duracion\\_de\\_los\\_terremotos\\_en\\_la\\_respuesta\\_inelastica\\_de\\_las\\_estructuras](https://www.researchgate.net/publication/259800994_Efectos_de_la_duracion_de_los_terremotos_en_la_respuesta_inelastica_de_las_estructuras)
- [5] R. E. Alva, L. A. Pinzón, y L. G. Pujades, “Intensidad de Arias y duración significativa en análisis dinámico de estructuras”, *Ingeniería*, vol. 32, no. 2, pp. 1–14, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.15517/ri.v32i2.49580>
- [6] LIS-UCR, “Intensidad de Arias: medida de energía sísmica”, Laboratorio Ing. Sísmica, Universidad de Costa Rica, 2018. [En línea]. Disponible en: [https://lis.ucr.ac.cr/mapas/2018-08-15-00%3A16%3A05/arias.php?utm\\_source.com](https://lis.ucr.ac.cr/mapas/2018-08-15-00%3A16%3A05/arias.php?utm_source.com)

- [7] Eurocódigo 8, *Diseño de estructuras para resistencia sísmica*, UNE-EN 1998-1:2004, Asociación Española de Normalización, 2004.  
[https://structuraldynamics.ulb.be/DOS/Eurocode8.pdf?utm\\_source=.com](https://structuraldynamics.ulb.be/DOS/Eurocode8.pdf?utm_source=.com)
- [8] FEMA-356, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, 2000. [En línea]. Disponible en:  
[https://nehrpsearch.nist.gov/static/files/FEMA/PB2009105376.pdf?utm\\_source.com](https://nehrpsearch.nist.gov/static/files/FEMA/PB2009105376.pdf?utm_source.com)
- [9] O. López, y G. Del Ré Ruíz, “Evaluación de los métodos de análisis estático no-lineal para determinar la demanda sísmica en estructuras aporricadas de concreto armado”, *IMME*, vol. 46, no. 3, pp. 1–18, Caracas, Venezuela, 2008. [En línea]. Disponible en:  
[https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0376-723X2008000300001](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0376-723X2008000300001)
- [10] E. Vásquez, R. Aguiar, y A. Aref, “Análisis de respuesta elástica en el tiempo aplicando el método de Newmark y el método de Wilson,” *Revista CIENCIA*, vol. 18, no. 2, pp. 279–302, 2016. [En línea]. Disponible en:  
<https://es.scribd.com/document/521810761/Metodos-Newmark-y-Wilson>
- [11] A. K. Chopra, *Dinámica de Estructuras*, Pearson Educación, México, 2014.  
<https://hebmerma.com/wp-content/uploads/2020/10/Dinamica-de-Estructuras-4Ed-Anil-K.-Chopra-1.pdf>
- [12] W. Pawirodikromo, “The Effects of Earthquake Significant Duration D595 to the Earthquake Intensity Measures and the Inelastic Response of SDOF Reinforced Concrete Structure”, *MATEC Web of Conferences*, vol. 280, art. 01005, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928001005>
- [13] D. Caicedo, S. Karimzadeh, V. Bernardo, y P. B. Lourenço, “Selection and scaling approaches of earthquake time-series for structural engineering applications: a state-of-the-art review”, *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 31, pp. 1475–1505, 2024. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11831-023-10025-y>
- [14] S. Hasanoğlu, A. Güllü, A. Anil Dindar, Z. Müderrisoğlu, H. Özkaynak, y A. Bozer, “Optimal selection and scaling of ground motion records compatible with input energy and acceleration spectra”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 53, no. 7, pp. 2382–2404, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/eqe.4114>
- [15] A. S. López-Castañeda, O. Martín del Campo, y E. Reinoso, “Seismic hazard study for the duration of ground-motions triggered by intraslab earthquakes”, *Natural Hazards*, vol. 120, pp. 12221–12263, 2024. [En línea]. Disponible en:  
<https://doi.org/10.1007/s11069-024-06682-2>
- [16] S. Céspedes, J. P. Stewart, y R. Montalva, “Strong-motion models for Arias intensity and duration for Chilean earthquakes,” *Journal of Earthquake and Tsunami*, vol. 16, no. 4, 2022. [En línea]. Disponible en:  
<https://www.worldscientific.com/doi/10.1142/S1793431122500105>
- [17] J. M. Liu, B. Zhang, y X. D. Zhao, “Empirical relationships between Arias Intensity and peak ground acceleration for western China”, *Frontiers in Earth Science*, vol. 12, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1434194>
- [18] Li Xuejing, Xu Weijin, y Gao Mengtan, “Characteristics of Arias intensity and Newmark displacement of strong ground motion in Lushan earthquake”, *Acta Seismologica Sinica*, vol. 43, no. 6, pp. 768–786, 2021. [En línea]. Disponible en:  
<https://doi.org/10.11939/jass.20200180>

- [19] F. M. Wani, J. Vemuri, y C. Rajaram, “Strong ground motion characteristics observed in the February 6, 2023 MW7.7 Türkiye earthquake”, *Earthquake Science*, vol. 37, no. 3, pp. 241–266, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eqs.2024.03.005>
- [20] M. Harati, y J. W. van de Lindt, “Impact of long-duration earthquakes on successive structural response and collapse performance”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, vol. 150, no. 10, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-13018>
- [21] M. A. Bravo-Haro, M. Liapopoulou, y A. Y. Elghazouli, "Seismic collapse capacity assessment of SDOF systems incorporating duration and instability effects", *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 18, no. 7, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00829-9>
- [22] Dhadse, G. D., Ramtekkar, G. D., & Bhatt, G, " Finite Element Modeling of Soil Structure Interaction System with Interface", *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 28, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09505-2>



# Mejora de las inspecciones de 100 horas en aeronaves agrícolas Thrush S2R-T34 mediante mantenimiento ajustado

## *(Enhancement of 100-Hour Inspections on Thrush S2R-T34 Agricultural Aircraft through Lean Maintenance)*

John Oswaldo Cajamarca Guerrero, Rodger Benjamín Salazar Loor  
Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador  
[jcajamarca@uteq.edu.ec](mailto:jcajamarca@uteq.edu.ec), [rsalazarl@uteq.edu.ec](mailto:rsalazarl@uteq.edu.ec)

**Resumen:** En la aviación agrícola empleada para la aplicación aérea de herbicidas en plantaciones, las inspecciones de 100 horas especificadas por la normativa de la FAA -14 CFR §91.409 garantizan seguridad y disponibilidad, pero enfrentan problemas como inventarios excesivos, desplazamientos innecesarios y reprocesos. Este trabajo propone aplicar *Lean Maintenance* en aviones Thrush S2R-T34, integrando la metodología 5S para optimizar talleres, un sistema *Just-in-Time* para suministro eficiente de repuestos y una lista de verificación digital basada en Análisis Modal de Fallos y Efectos y Diagrama de Análisis de Procesos. La intervención mostró una reducción del 40 % en inventario improductivo, del 45 % en tiempo de gestión de repuestos y del 26,7 % en desplazamientos. Además, los indicadores revelaron mejoras significativas: el MTBF aumentó de 13,0 h a 26,6–29,5 h (+115 %), el MTTR disminuyó de 4,3–4,6 h a  $\approx$  3,1 h (–30 %) y la disponibilidad mecánica se incrementó del 74–75 % al 90 %, liberando aproximadamente 120 h-vuelo adicionales por semestre y aeronave. Este modelo escalable ofrece una estrategia replicable para optimizar mantenimiento aeronáutico.

**Palabras clave:** AMFE, 5S, justo a tiempo, MRO aeronáutico, disponibilidad mecánica.

**Abstract:** In agricultural aviation used for aerial herbicide application in plantations, 100-hour inspections as specified by FAA regulation 14 CFR §91.409, ensure safety and availability but face issues such as excessive inventories, unnecessary movements, and rework. This study proposes applying Lean Maintenance to Thrush S2R-T34 aircraft, integrating the 5S methodology to optimize workshops, a Just-in-Time system for efficient spare-parts supply, and a digital checklist based on Failure Mode and Effects Analysis and a Process Analysis Diagram. The intervention reduced non-productive inventory by 40%, spare-parts management time by 45%, and movements by 26,7%. Key indicators also improved significantly: MTBF increased from 13,0 h to 26,6–29,5 h (+115%), MTTR dropped from 4,3–4,6 h to  $\approx$  3,1 h (–30%), and mechanical availability rose from 74–75% to 90%, freeing approximately 120 flight-hours per semester per aircraft. This scalable model offers a replicable strategy to optimize aircraft maintenance.

**Keywords:** FMEA, 5S, Just-in-Time, Aeronautical MRO, Mechanical availability.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la agricultura intensiva, el uso de aeronaves tripuladas o no tripuladas se ha consolidado como la alternativa más rentable y ágil para el control fitosanitario, pues permite reaccionar con rapidez ante brotes inesperados de plagas y cubrir grandes extensiones sin dañar ni el cultivo ni la estructura del suelo, a diferencia de la maquinaria terrestre [1]. Además, operar a la altitud óptima contribuye a lograr

una deposición más uniforme de las gotas, incrementando la eficacia biológica y reduciendo tanto los costes como los tiempos de aplicación en comparación con los métodos convencionales [2]. Sin embargo, estas aeronaves afrontan condiciones operativas extremas como cargas cíclicas elevadas, abrasión por partículas y ciclos térmicos bruscos, que aceleran los procesos de fatiga estructural y corrosión superficial, generan microfracturas en el fuselaje y, en última instancia, acortan su vida útil [3].

Para hacer frente a estos retos, el sector ha adoptado modelos de mantenimiento integrados que optimizan la planificación de las intervenciones y reducen los costes operativos. Por una parte, el análisis predictivo, fundamentado en la estimación de la demanda y en la caracterización del rendimiento de los equipos, define umbrales que evitan tareas innecesarias. Este enfoque continuo y basado en datos anticipa posibles fallos, minimiza los tiempos de inactividad y mejora la programación de actividades [4]. Por otra parte, el mantenimiento basado en la condición (CBM) emplea el estado real del activo, medido mediante variables como vibración, temperatura, desgaste o análisis de aceite, para detectar la degradación y programar acciones correctivas cuando los indicadores superan umbrales predefinidos, en lugar de hacerlo por calendario [5].

En este contexto, los procesos de Mantenimiento, Reparación y Revisión (MRO) resultan imprescindibles para garantizar la seguridad y la fiabilidad operacional; este mercado factura anualmente alrededor de 78.500 millones de dólares, suponiendo aproximadamente el 11 % de los costes operativos de una aerolínea [6]. Siendo esencial la eliminación de desperdicios y control de costes para mejora de su eficiencia, ya que un MRO reactivo incrementa significativamente las incidencias, los fallos y los periodos de inactividad, poniendo en riesgo la disponibilidad de la flota [7].

En el ámbito de la aviación comercial, donde la fiabilidad y la disponibilidad son pilares de la seguridad operacional, los costes de mantenimiento representan aproximadamente un 13 % de los gastos de explotación, mientras que las interrupciones no planificadas pueden absorber entre el 15 % y el 60 % del presupuesto total. Los enfoques tradicionales de mantenimiento, ya sea la reparación reactiva tras una avería o la ejecución de programas preventivos rígidos, presentan limitaciones claras: el primero genera elevados costes de oportunidad al operar de forma estrictamente reactiva, y el segundo realiza intervenciones innecesarias al no ajustarse al estado real de los activos, lo que conduce a sobrecostes y a una reducción de la eficiencia global [8].

El enfoque Lean se concibe como un sistema de creación de valor orientado a la eliminación de actividades que no aportan valor y a la promoción de la mejora continua impulsada por el equipo humano, lo que exige adaptaciones específicas en los procesos de MRO debido a la baja frecuencia de las intervenciones y la complejidad técnica involucrada [9]. El mantenimiento ajustado traslada estos principios al ámbito aeronáutico, integrando prácticas de mantenimiento productivo total (TPM) y mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) para optimizar la planificación de las intervenciones, reducir costes y maximizar la disponibilidad operativa de los activos [10].

Entre sus herramientas fundamentales destaca el análisis de modos y efectos de falla (FMEA), metodología sistemática y preventiva originalmente desarrollada por la NASA para anticipar y mitigar modos de fallo en entornos aeroespaciales, así como la gestión *Just in Time* (JIT) de repuestos y el mantenimiento predictivo basado en condición, que permiten programar acciones correctivas de acuerdo con el estado real de los componentes [11]. Asimismo, se aplican metodologías como 5S, Kanban y *Single Minute Exchange of Die* (SMED) para reducir tiempos de preparación y eliminar desperdicios asociados a la sobreproducción, los tiempos de espera y los movimientos innecesarios, alineando los procesos de MRO con objetivos de eficiencia y calidad [12].

De igual modo, al integrar metodologías Lean en el MRO, como 5S, TPM, mantenimiento autónomo y gestión visual, se han eliminado tareas no productivas de las rutas críticas, mejorado el rendimiento de los equipos técnicos, potenciado el resultado de las acciones de mantenimiento y se ha aumentado la eficiencia de la cadena de suministro, liberando espacio y recursos, reforzando la



autonomía del personal, optimizando las condiciones ergonómicas y de seguridad, y reduciendo significativamente los tiempos de inactividad, lo que consolida un mantenimiento más ágil y sostenible [13], [14]. En este sentido, *Lean Maintenance* se erige como la evolución natural del TPM al integrar estrategias de mantenimiento proactivo con prácticas de manufactura esbelta, dando lugar a un ciclo de mejora continua que maximiza la eficiencia operativa, crea mayor valor para clientes y partes interesadas, y alinea las operaciones de MRO con los objetivos estratégicos de negocio y la excelencia operacional [15].

Ante el reto de asegurar la máxima disponibilidad y seguridad de la flota, tanto en mantenimiento en línea como en revisiones de hangar, se identifican desperdicios operativos que lastran la eficiencia del sistema MRO. Entre ellos destacan la sobreproducción, los desplazamientos y movimientos innecesarios, el exceso de inventario de piezas, las demoras por espera de repuestos o documentación, las tareas que no aportan valor y la subutilización de las competencias técnicas del personal [16].

El mantenimiento Lean ha aliviado muchos desperdicios, pero las inspecciones periódicas en MRO aún se topan con cuellos de botella críticos. Aunque cada aeronave cuenta con documentación técnica personalizada y en condiciones normales no deberían existir diferencias con su configuración real, en la práctica aparecen discrepancias puntuales, como supersedencias de números de parte, certificados suplementarios de tipo recientes o boletines de servicio aún no reflejados, que retrasan la localización de piezas esenciales; el uso exclusivo de planos bidimensionales con detalles operativos incompletos obliga a consultas frecuentes al fabricante; las condiciones ergonómicas deficientes y los espacios reducidos aumentan la fatiga de los técnicos y prolongan los tiempos de intervención; la similar morfología de múltiples componentes en entornos complejos complica su identificación; y las largas secuencias de desmontaje y montaje generan desplazamientos y esperas innecesarias que elevan costes, ponen en riesgo la seguridad y merman la disponibilidad de la flota [17].

La normativa de Estados Unidos (FAA, 14 CFR §91.409 y 14 CFR Parte 43, Apéndice D, edición 2025) exige, además de la inspección anual, una revisión cada 100 horas de vuelo para las aeronaves empleadas en operaciones comerciales o instrucción remunerada. La inspección de 100 horas puede ser realizada y aprobada para retorno al servicio por un mecánico con licencia A&P o por un taller de reparación certificado conforme a la parte 145. En cambio, la inspección anual requiere un inspector con autorización IA. Se contempla un plazo de hasta diez horas de vuelo para trasladar la aeronave al taller sin interrumpir el siguiente ciclo de inspección y, en flotas de alta utilización, este proceso puede dividirse en fases más cortas para minimizar el tiempo de inactividad [18].

Durante la inspección de 100 horas, obligatoria cuando la aeronave se emplea para trabajo aéreo o instrucción remunerada, la ejecución se realiza dentro del programa de mantenimiento aprobado del operador. Este programa se basa en las instrucciones y manuales del fabricante, con sus tareas, referencias e intervalos, y se adapta a los activos y medios de operación del explotador con la aceptación de la autoridad aeronáutica. En esa inspección se revisan en detalle la integridad de largueros, costillas y uniones alares; los cables, poleas y bisagras de los sistemas de control; los puntos de fijación y las posibles fugas del motor; así como el desgaste, la corrosión y el funcionamiento de los amortiguadores del tren de aterrizaje. Aunque algunos fabricantes permiten ajustes de trimado o rigging en tierra, se desaconseja realizarlos sin la documentación aplicable y la validación en vuelo correspondientes, ya que podrían comprometer la estabilidad certificada del ala. Al cierre, el mecánico autorizado registra la fecha, el total de horas y su firma en el libro de mantenimiento. El operador, por su parte, verifica la vigencia del certificado de aeronavegabilidad, el registro, las limitaciones operativas y el cálculo de peso y balance antes de autorizar el siguiente vuelo [19].

El mantenimiento aeronáutico de aviónica está sometido a los más exigentes estándares de la Administración Federal de Aviación de Estados Unidos (FAA) y de la Agencia de Seguridad Aérea de la Unión Europea (EASA), que cubren la formación y certificación del personal, así como procedimientos exhaustivos de inspección, calibración y reparación de los sistemas eléctricos, electrónicos, de navegación, comunicación e instrumentación de la aeronave. Cada intervención debe



quedar documentada de manera detallada, lo que refuerza la fiabilidad y la seguridad operacional de los sistemas y protege al operador de posibles sanciones administrativas o responsabilidades penales cuando se respeta la normativa. Asimismo, corresponde al operador comprobar que todas las labores de mantenimiento aeronáutico de aviónica se han ejecutado conforme a los manuales de servicio y a las directrices regulatorias vigentes, garantizando así la continuidad de la aeronavegabilidad [20].

Como complemento al exigente marco regulatorio del mantenimiento aeronáutico, la metodología 5S, de origen japonés, se despliega en cinco fases encadenadas: *Seiri* (clasificar), *Seiton* (ordenar), *Seiso* (limpiar), *Seiketsu* (estandarizar) y *Shitsuke* (disciplina) [21]. Su propósito es eliminar actividades sin valor añadido, optimizar los flujos de trabajo y mantener los espacios de taller limpios y ordenados. Mediante ayudas visuales y procedimientos estandarizados, 5S reduce drásticamente los tiempos de búsqueda de herramientas e insumos, minimiza movimientos y retrabajos, y mejora la seguridad, la ergonomía y la productividad. Sin embargo, la durabilidad de estos resultados exige el compromiso activo de todos los niveles de la organización y un patrocinio constante de la alta dirección; de lo contrario, incluso las prácticas 5S más consolidadas tienden a degradarse con el tiempo y a poner en riesgo la cultura de mejora continua [22].

Sumado a la estandarización 5S, los indicadores clave de desempeño (KPIs) aportan métricas objetivas para medir tanto la eficiencia de las operaciones de mantenimiento como la fiabilidad de los activos [23]. Tras definir indicadores como el tiempo medio entre fallos (MTBF), el tiempo medio de reparación (MTTR), se despliegan sistemas de monitorización en tiempo real y ciclos de evaluación periódica que capturan datos precisos. Esta información alimenta modelos predictivos, permite optimizar la planificación de intervenciones y priorizar recursos donde generen mayor impacto. Al cuantificar el rendimiento frente a los objetivos estratégicos, los KPIs validan la efectividad de cada acción, facilitan la detección temprana de desviaciones y respaldan la gobernanza de los activos mediante informes integrados y paneles de control dinámicos [24].

El objetivo de esta investigación es optimizar las inspecciones de 100 horas en los aviones agrícolas Thrush S2R-T34 aplicando un enfoque de mantenimiento ajustado. Se analiza cómo la implantación de 5S, el abastecimiento JIT y el (AMFE) contribuye a minimizar tiempos no productivos, reducir el mantenimiento correctivo reactivo y elevar la disponibilidad operativa y la fiabilidad de la flota. Para cuantificar estos beneficios, se identifican y miden los principales desperdicios durante la inspección y su impacto global, usando los indicadores MTBF, MTTR y disponibilidad mecánica.

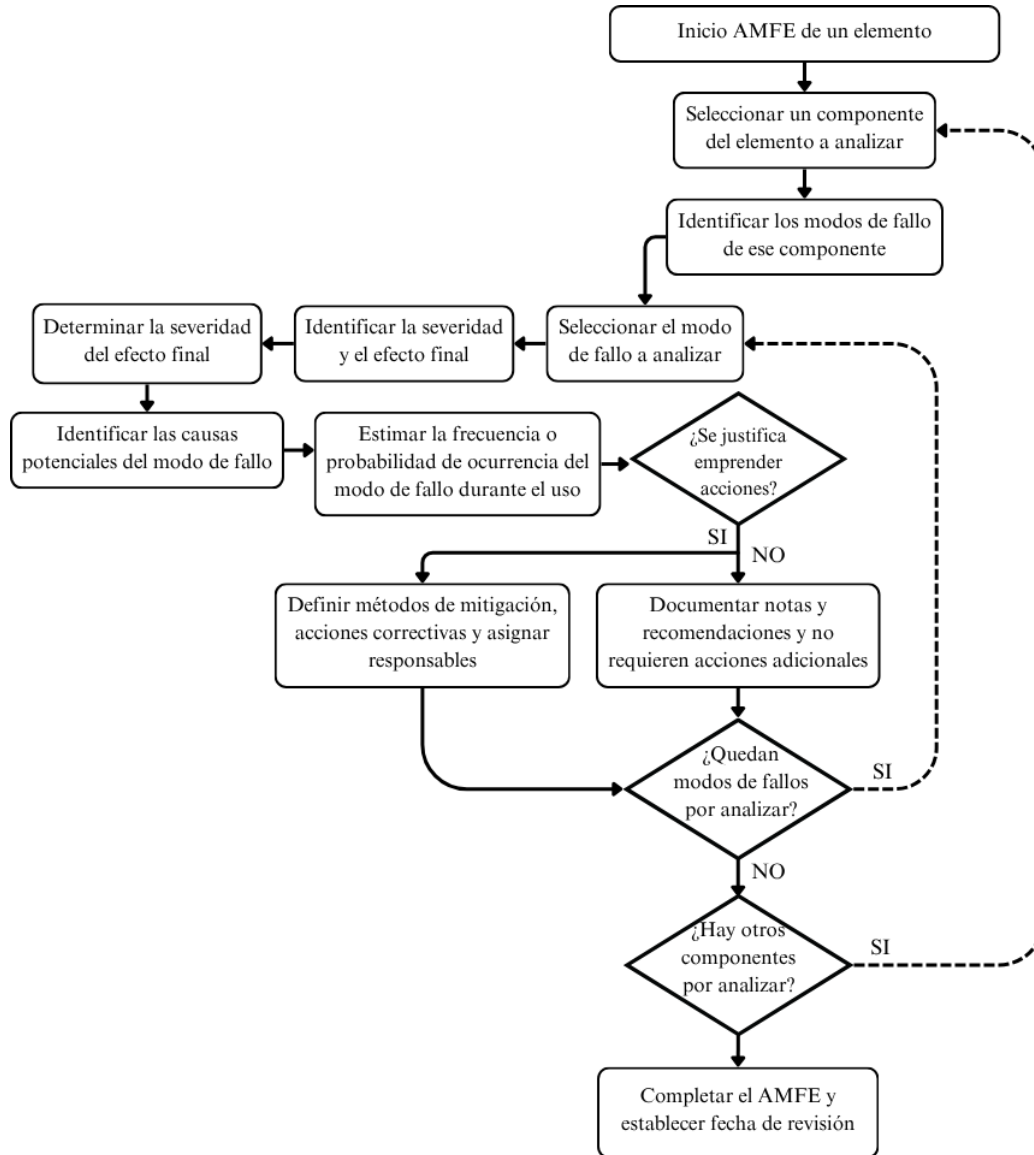
## 2. METODOLOGÍA

Metodológicamente, la intervención arranca con la organización y agilización del taller mediante 5S y un sistema JIT para eliminar desplazamientos y esperas innecesarias. A continuación, se despliega el AMFE para anticipar y priorizar modos de fallo críticos, definiendo acciones preventivas concretas. La eficacia de cada fase se valida mediante la comparación de los KPIs, MTBF, MTTR, antes y después de la implementación. Finalmente, se propone un modelo modular y escalable que otras organizaciones de aviación agrícola puedan adaptar para mejorar sus procesos de mantenimiento y optimizar costes operativos.

El AMFE se llevó a cabo conforme a la norma UNE-EN 60812, un estándar internacional para el análisis sistemático de riesgos en sistemas complejos [25]. Según esta guía, el AMFE es un método analítico y estructurado que identifica modos de fallo potenciales, determina sus causas y evalúa los efectos sobre el desempeño del sistema, así como las vías de detección temprana. La priorización resultante facilita el diseño de acciones correctivas y preventivas orientadas a mitigar los riesgos más críticos.

El procedimiento siguió el diagrama de flujo de la norma UNE-EN 60812 que se muestra en la Figura 1, que organiza de manera ordenada cada fase del AMFE: selección del componente, identificación de modos de fallo, análisis de causas y efectos, evaluación del riesgo y definición

de acciones de mitigación. En primer lugar, se determinó el conjunto de elementos críticos del Thrush S2R-T34; para cada uno se registraron los posibles modos de fallo, se analizaron sus causas raíz y se describieron sus consecuencias operativas. Posteriormente, estos datos sirvieron de base para calcular el número de prioridad de riesgo (NPR) y priorizar las medidas preventivas y correctivas más efectivas.



**Figura 1.** Procedimiento AMFE: diagrama de flujo basado en la norma UNE-EN 60812.

La valoración de los riesgos se realizó mediante tres escalas estandarizadas con valores de 1 a 10 para severidad (S), ocurrencia (O) y detección (D), de acuerdo con la norma UNE-EN 60812 y adaptadas en las Tablas 1 a 3. La severidad (Tabla 1) clasifica el impacto de cada modo de fallo en el rendimiento y la seguridad del sistema, donde 1 = sin efecto y 10 = peligroso sin aviso. La ocurrencia (Tabla 2) cuantifica la frecuencia prevista, donde 1 = remoto y 10 = casi inevitable. Por último, la detección (Tabla 3) mide la probabilidad de identificar un fallo antes de su manifestación, donde 1 = detección casi segura y 10 = detección absolutamente incierta, en función de la eficacia de los controles de diseño y supervisión.

**Tabla 1.** Escala de severidad de modos de fallo para AMFE.

<b>Severidad</b>	<b>Criterios</b>	<b>S</b>
Ninguna	No hay efecto apreciable.	1
Muy pequeña	Ajuste y acabado del elemento con chirrido o ruido no conforme. Defecto percibido por clientes exigentes (< 25 %).	2
Menor	Ajuste y acabado del elemento con chirrido o ruido no conforme. Defecto percibido por el 50 % de los clientes.	3
Muy baja	Ajuste y acabado del elemento con chirrido o ruido no conforme. Defecto percibido por la mayoría de los clientes (> 75 %).	4
Baja	Vehículo o elemento operativo, pero reducción en la operatividad de los elementos de confort y comodidad. Cliente de algún modo insatisfecho.	5
Moderada	Vehículo o elemento operativo, pero elementos de confort y comodidad no operativos. Cliente insatisfecho.	6
Alta	Vehículo o elemento operativo, pero con nivel de prestaciones reducido. Cliente muy insatisfecho.	7
Muy alta	Vehículo o elemento no operativo (pérdida de función principal).	8
Peligroso con aviso	Muy alto rango de severidad cuando un modo de fallo potencial afecta a la operación segura del vehículo o supone el incumplimiento de leyes gubernamentales con aviso.	9
Peligroso sin aviso	Muy alto rango de severidad cuando un modo de fallo potencial afecta a la operación segura del vehículo o supone el incumplimiento de leyes gubernamentales sin aviso.	10

**Tabla 2.** Escala de ocurrencia de modos de fallo para AMFE.

<b>Ocurrencia del modo de fallo</b>	<b>O</b>	<b>Frecuencia por millar de vehículos o elementos</b>	<b>Probabilidad</b>
Remoto: Fallo improbable	1	$\leq 0,010$	$\leq 1 \times 10^{-5}$
Bajo: Relativamente pocos fallos	2	0,1	$1 \times 10^{-4}$
	3	0,5	$5 \times 10^{-4}$
	4	1	$1 \times 10^{-3}$
Moderado: Fallos ocasionales	5	2	$2 \times 10^{-3}$
	6	5	$5 \times 10^{-3}$
	7	10	$1 \times 10^{-2}$
Alto: Fallos repetidos	8	20	$2 \times 10^{-2}$
	9	50	$5 \times 10^{-2}$
Muy alto: Fallo casi inevitable	10	$\geq 100$	$\geq 1 \times 10^{-1}$

**Tabla 3.** Escala de detección de modos de fallo para AMFE.

<b>Detección</b>	<b>Posibilidad de detección mediante Control de Diseño</b>	<b>D</b>
Casi segura	Detectará casi con seguridad una causa o mecanismo potencial y el subsiguiente modo de fallo.	1
Muy alta	Muy alta posibilidad de que detecte una causa o mecanismo potencial y el subsiguiente modo de fallo.	2
Alta	Alta posibilidad de que detecte una causa o mecanismo potencial y el subsiguiente modo de fallo.	3
Moderadamente alta	Moderadamente alta posibilidad de que detecte una causa o mecanismo potencial y el subsiguiente modo de fallo.	4
Moderada	Posibilidad moderada de que detecte una causa o mecanismo potencial y el subsiguiente modo de fallo.	5
Baja	Baja posibilidad de que el Control de Diseño detecte una causa o mecanismo potencial y el subsiguiente modo de fallo.	6
Muy baja	Muy baja posibilidad de que detecte una causa o mecanismo potencial y el subsiguiente modo de fallo.	7
Remota	Posibilidad remota de que detecte una causa o mecanismo potencial y el subsiguiente modo de fallo.	8
Muy remota	Posibilidad muy remota de que detecte una causa o mecanismo potencial y el subsiguiente modo de fallo.	9
Absolutamente incierto	No detectará una causa o mecanismo potencial ni el subsiguiente modo de fallo; o no existe Control de Diseño aplicado.	10

Para integrar estas tres valoraciones en un único indicador que permita priorizar los modos de fallo, se calculó el Número de Prioridad de Riesgo (NPR), definido como:

$$NPR = S \times O \times D \quad (1)$$

Un NPR elevado señala modos de fallo de alto riesgo que requieren intervenciones inmediatas y detalladas, mientras que valores más bajos indican riesgos menores susceptibles de atenderse con controles rutinarios. Dado que S, O y D toman valores de 1 a 10, el NPR varía entre 1 y 1000. Para su interpretación se adopta la siguiente clasificación por intervalos y la acción recomendada en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Clasificación del Número de Prioridad de Riesgo.

<b>Intervalo NPR</b>	<b>Categoría</b>	<b>Criterio resumido</b>	<b>Acción recomendada</b>
1–50	Muy bajo	Riesgo residual	Mantener controles y seguimiento rutinario
51–125	Bajo	Riesgo controlado	Plan de mejora a medio plazo
126–250	Moderado	Riesgo relevante	Plan de mejora priorizado con responsable y plazo
251–500	Alto	Riesgo significativo	Acciones correctivas inmediatas y verificación
501–1000	Crítico	Riesgo inaceptable	Contención inmediata, posible paro de proceso y rediseño

De este modo, el NPR facilita una asignación de recursos más eficiente y una planificación de mantenimiento dirigida a los puntos críticos. Tras completar el análisis AMFE y calcular el NPR, se incorpora un Diagrama de Análisis de Procesos (DAP) para descomponer y visualizar el flujo de actividades del mantenimiento. Este diagrama segmenta cada tarea según su función (operaciones, transporte, inspección, esperas y almacenamiento) siguiendo los principios de la ingeniería de métodos [26]. Al clasificar las acciones de este modo, resulta inmediato detectar aquellos pasos que no aportan valor, así como redundancias, desplazamientos innecesarios y tiempos ociosos. En la práctica, la elaboración del DAP implica observación directa en el taller, midiendo con cronómetros digitales y registros estructurados la duración de cada tarea, las distancias recorridas y la frecuencia de los eventos, de modo que la sistematización de datos respalde mejoras concretas en el proceso.

Para cuantificar el desempeño se emplean tres indicadores clásicos de confiabilidad y mantenimiento: la disponibilidad mecánica MA, entendida como la proporción entre el tiempo de operación efectiva y el tiempo total considerado, medidos mediante el MTBF y MTTR [27, 28]. El MTBF representa el promedio de horas de funcionamiento entre eventos de fallo, mientras que el MTTR refleja el tiempo medio necesario para restaurar la operatividad tras cada reparación; y la MA expresa la fracción de tiempo en que el activo está operativo [29].

Estos indicadores se obtienen a partir de las Ecuaciones (2), (3) y (4):

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo total disponible} - \text{Tiempo de inactividad}}{\text{Número de paradas}} \quad (2)$$

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de mantenimiento}}{\text{Número de reparaciones}} \quad (3)$$

$$MA = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100 \quad (4)$$

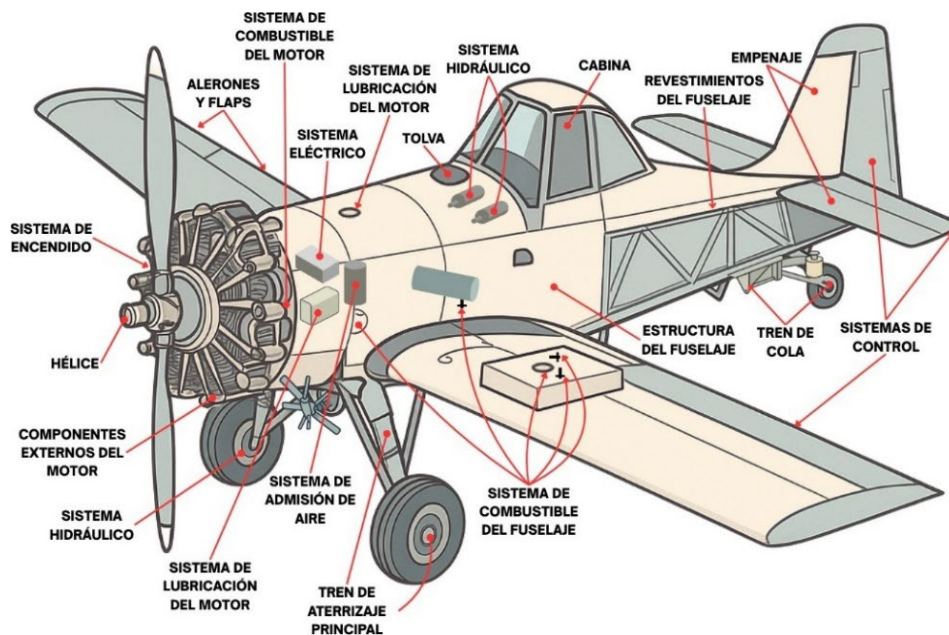
Adicionalmente, se analiza la fiabilidad  $R(t)$ , definida como la probabilidad de operar sin falla durante un intervalo  $t$  [30]. Con tasa de falla constante  $\lambda \approx 1/MTBF$ , la función de fiabilidad se expresa mediante la Ecuación (5):

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{MTBF}} \quad (5)$$

### 3. RESULTADOS

A partir del mapeo exhaustivo de los dieciocho sistemas críticos de la Thrush S2R-T34 (hélice, motor, lubricación y combustible, tren de aterrizaje, superficies de control y aviónica), y tal como se muestra en la Figura 2, la organización estructuró su programa de mantenimiento en tres niveles interdependientes orientados a maximizar la seguridad, la fiabilidad operativa y la disponibilidad de la flota. El mapeo se realizó conforme a la codificación ATA 100/2200; en esta norma el sistema eléctrico corresponde al capítulo 24, el hidráulico al 29, el tren de aterrizaje al 32 y los controles de vuelo al 27, numeración que también guía las referencias en manuales y tarjetas de trabajo. Este esquema se alinea con los procedimientos técnicos del fabricante [31] e integra prácticas 5S junto con estrategias Lean de mejora continua.

Para clarificar el alcance de cada tipo de intervención y su peso relativo en la carga de trabajo, se organizaron las actividades de mantenimiento en tres niveles conforme a la práctica de la entidad y al manual del fabricante. La Tabla 5 sintetiza la periodicidad o disparador, las actividades clave, ejemplos representativos y el esfuerzo aproximado asignado a cada nivel en las aeronaves Thrush S2R-T34.



**Figura 2.** Mapa de ubicación de los sistemas críticos en la aeronave agrícola Thrush S2R-T34.

**Tabla 5.** Niveles de mantenimiento y alcance (Thrush S2R-T34).

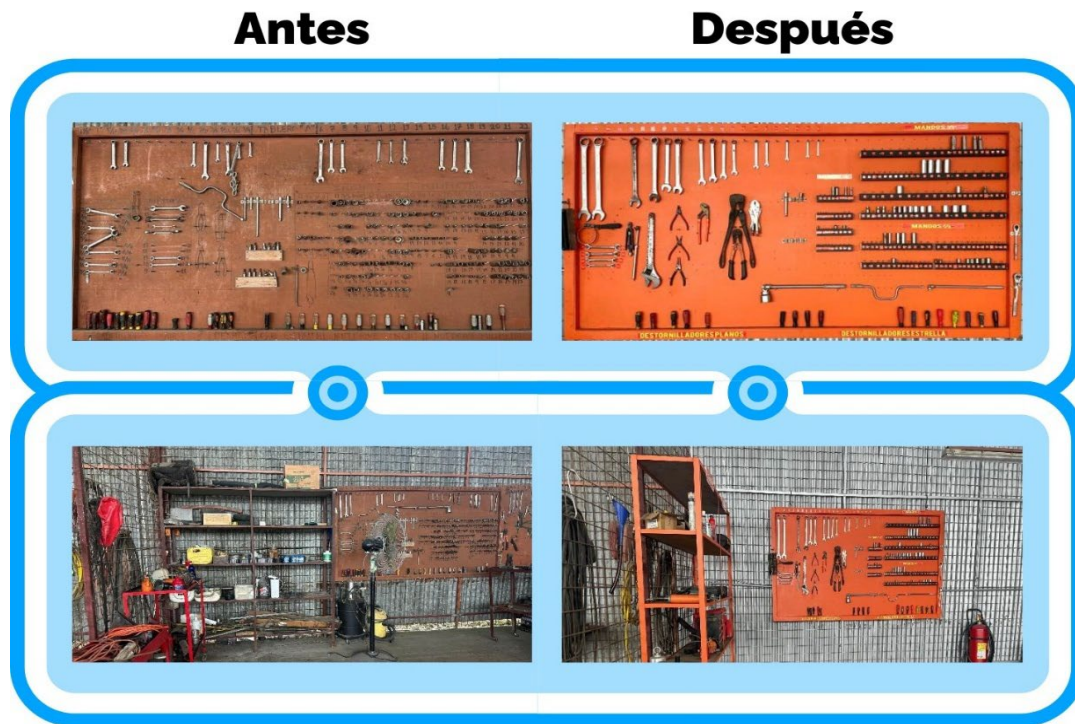
Nivel	Periodicidad / disparador	Actividades clave	Ejemplos de tareas	Esfuerzo aprox.
Preventivo	Cada 25 h de vuelo	Lubricación; inspecciones visuales y funcionales; cambio de fluidos según fabricante	Lubricar bisagras, rodamientos y articulaciones; cambiar aceite de motor, hidráulico y combustible	35 %
Programado	Cada 100 h de vuelo	Verificaciones y pruebas de sistemas; inspección estructural	Sincronización de magnetos; verificación del gobernador de la hélice; pruebas de estanqueidad de frenos y combustible; inspección de fuselaje, alas y empenaje; comprobación de sistemas eléctricos e instrumentación de cabina	35 %
Correctivo	Ante avería o hallazgo	Reparaciones inmediatas derivadas de fallas en vuelo o durante inspecciones	Reparación de motor tras sobrecalentamiento; refuerzo de larguerillos; sustitución de paneles corroídos; reparación de cableados; cambio de llantas o discos de freno tras aterrizajes exigentes	30 %



### a. Implementación de las 5S

En la entidad operadora, la implantación de las 5S, compuestas por Clasificar (*Seiri*), Ordenar (*Seiton*), Limpiar (*Seiso*), Estandarizar (*Seiketsu*) y Mantener (*Shitsuke*), se concibió como pilar del sistema Lean aplicado a las inspecciones de 100 horas de vuelo en los Thrush S2R-T34. El despliegue ordenado de cada etapa impulsó una organización más clara del taller, redujo tiempos improductivos y reforzó la seguridad del entorno de trabajo. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada uno de estos cinco ámbitos.

**Seiri:** Durante la fase de *Seiri* se llevó a cabo una auditoría exhaustiva del inventario en el pañol, las carretas móviles y la mesa de trabajo, clasificando cada ítem según su contribución a las inspecciones de 100 horas. Esto permitió identificar y retirar elementos obsoletos, duplicados o de muy baja rotación, reduciendo el volumen almacenado en un 40 %. El material descartado se trasladó al almacén de baja conforme al procedimiento interno. A continuación, se definió un stock esencial basado en herramientas críticas, como llaves mixtas y especiales, juegos de dados, dispositivos neumáticos, lubricantes y equipos de medición; a cada artículo se le asignó una ubicación única, identificada mediante códigos de color y rotulación alfanumérica para garantizar su trazabilidad. Mediante esta depuración se liberaron espacios operativos que se destinaron a zonas específicas de tránsito y estacionamiento de carretas. La Figura 3 ilustra el antes y el después de aplicar esta primera etapa de la metodología 5S.



**Figura 3.** Pañol de herramientas del hangar (tablero y estanterías): comparativa antes y después de *Seiri* (5S).

**Seiton:** En la fase de *Seiton* se organizó el inventario crítico resultante de *Seiri* en un sistema de ubicación inequívoca y reposición ágil. Según la Tabla 6, los 66 artículos esenciales se consolidaron en un único tablero perforado del pañol, ordenados por familias y frecuencia de uso. Cada posición lleva silueta y código alfanumérico visible; el color identifica la familia y el código la ubicación y el calibre. Se fijaron alturas de alcance entre 80 y 140 cm para reducir flexiones y se separaron las herramientas calibradas con etiqueta de vigencia. La reposición se realiza con



niveles mínimo y máximo y tarjeta de señalización cuando falta un elemento. Se implementó además una bitácora de préstamo y devolución al cierre de turno. Con estas medidas se eliminaron duplicidades, se liberaron superficies de estantería, se despejaron pasillos y se redujo el tiempo de búsqueda y preparación antes de la inspección, mejorando la ergonomía y la seguridad en el hangar.

**Tabla 6.** Área de mantenimiento mecánico (pañol de herramientas del hangar): sistema de ubicación y etiquetado de herramientas críticas en la fase *Seiton* de 5S.

Ubicación	Frecuencia de uso	Elemento
Mesa de trabajo	Pocas veces a la semana	Martillo neumático sin fitting
		Taladro neumático sin fitting
	Se utiliza constantemente	Pernos, tornillos, rodelas
		Trípode “SENECA” (x2) Trípode “THRUSH” (x4)
Pañol de herramientas	Casi nunca	Bomba hidráulica
		Comprobador y limpiador de bujías
		Extintores
	Pocas veces a la semana	Soldadora
		Soporte de bujías
		Tanque de oxígeno y acetileno
		Tecele
		Gata hidráulica
	Rara vez a la semana	Máscara de soldar
		Juegos de expansores de tubos
		Taladro de pedestal
		Cama de trabajo
		Cargador de baterías
		Compresor de aire
		Conjunto de baterías
	Todos los días	Cortadora de láminas
Esmeril 1		
Esmeril 2		
GPU AMI-2400		
GPU START PACK con remolque		
Juego de tarraja		
Línea de aire		
Línea eléctrica 110 V		
Línea eléctrica 220 V		
Llave francesa 18"		
Pistola de calor		

<b>Ubicación</b>	<b>Frecuencia de uso</b>	<b>Elemento</b>
		Prensa 360° para taladro de pedestal Prensa hidráulica Prensas mecánicas Pulidora Remachadora manual POP Serrucho Sincronizador de magnetos
		Taladro eléctrico Taladro manual Torquímetros
Perchas	Pocas veces a la semana Rara vez a la semana Se utiliza constantemente Todos los días	Graseros Gata grande de 10 ton Gata pequeña de 2 ton Aceites Cajas de herramientas Grasas Lubricantes Engrasadores
Tablero de herramientas	Casi nunca Pocas veces a la semana Todos los días	Calibrador de bujías Medidor de presión de aire Dados copa corta de 12 puntos 1/2 Dados copa corta de 12 puntos 1/4 Dados copa corta de 12 puntos 3/8 Dados copa corta de 6 puntos 1/2 Dados copa corta de 6 puntos 1/4 Dados copa corta de 6 puntos 3/8 Dados copa profunda de 12 puntos 1/2 Dados copa profunda de 12 puntos 1/4 Dados copa profunda de 12 puntos 3/8 Dados copa profunda de 6 puntos 1/2 Dados copa profunda de 6 puntos 1/4 Dados copa profunda de 6 puntos 3/8 Extensiones Llaves mixtas y especiales Raches

**Seiso:** La fase de *Seiso* convirtió la limpieza en una actividad rutinaria del mantenimiento. Primero se eliminaron restos y desechos del pañol y del hangar, lo que permitió liberar espacio para perchas exclusivas de lubricantes y un tablero dedicado a las herramientas de uso más frecuente. A continuación, se instaló un Panel 5S (Tabla 7) que asigna responsables, materiales y un cronograma diario de limpieza para las siete zonas críticas: pañol, perchas, mesa de trabajo, carretas, hangar, vestidores y comedor. El horario de limpieza se ha ajustado para no interferir con las inspecciones de 100 h, de modo que al final de cada jornada se restablecen las condiciones de higiene definidas como referencia. Todas las tareas quedan registradas en el panel y se auditan quincenalmente, lo que permite corregir cualquier desviación antes de que impacte en la operatividad del taller.

**Seiketsu:** La fase de *Seiketsu* consolidó las mejoras de organización, orden y limpieza convirtiéndolas en hábitos permanentes dentro del sistema de mantenimiento. Para ello, se diseñó un cronograma semanal que agrupa las actividades de clasificación, limpieza, verificación y auditoría en franjas horarias compatibles con las inspecciones de 100 h, de modo que no se interrumpa el flujo operativo ni las rutinas críticas. En la Figura 4 se muestra este programa estandarizado, que detalla día a día los horarios y frecuencias de cada tarea, garantizando una secuencia coherente y sostenible a lo largo de la semana laboral.

**Tabla 7.** Sistema de limpieza rutinaria (*Seiso*) con panel de seguimiento de tareas.

Área	Descripción	Materiales	Frecuencia	Horarios
Pañol de Herramientas	Espacio para almacenamiento de herramientas, lubricantes, máquinas, etc.	Trapo de limpieza Desengrasante Organizadores	Diario	17:30 – 18:00
Perchas	Área designada para colgar y organizar productos de lubricación y herramientas menores.	Trapo de limpieza Detergente Pulverizador	Diario	17:30 – 18:00
Mesa de Trabajo	Superficie destinada al ensamblaje y ajustes de componentes aeronáuticos.	Trapo absorbente Desengrasante Solvente	Diario	17:30 – 18:00
Carretas de Herramientas	Carros móviles para transportar y organizar herramientas durante el mantenimiento.	Paños secos Detergente Cepillo manual	Diario	17:30 – 18:00
Hangar de Mantenimiento	Área principal de inspección y reparación de las aeronaves.	Escoba Aspiradora industrial Bolsa de basura	Diario	17:30 – 18:00
Vestidores	Espacio de uso personal del personal técnico.	Detergente Desinfectante Bolsa de basura	Diario	17:30 – 18:00
Comedor	Área de alimentación y descanso para los colaboradores.	Trapos húmedos Detergente Bolsa de basura	Diario	17:30 – 18:00

Para asegurar que los avances de *Seiri*, *Seiton* y *Seiso* se mantengan en el tiempo, se implementó un marco de gobernanza basado en ocho prácticas complementarias (Figura 5). En primer lugar, se nombró a un líder 5S responsable de coordinar y monitorear el cumplimiento de los estándares. A continuación, se integraron inspecciones periódicas con listas de verificación visuales para detectar desviaciones y activar acciones correctivas de inmediato. Todos los integrantes reciben formación Lean al incorporarse y acceden a formatos estandarizados que facilitan la documentación y el seguimiento de cada tarea. Asimismo, se garantizó un abastecimiento continuo de materiales y repuestos en cada estación de trabajo, y se definieron protocolos para identificar y suprimir obstáculos antes de que afecten el flujo operativo.

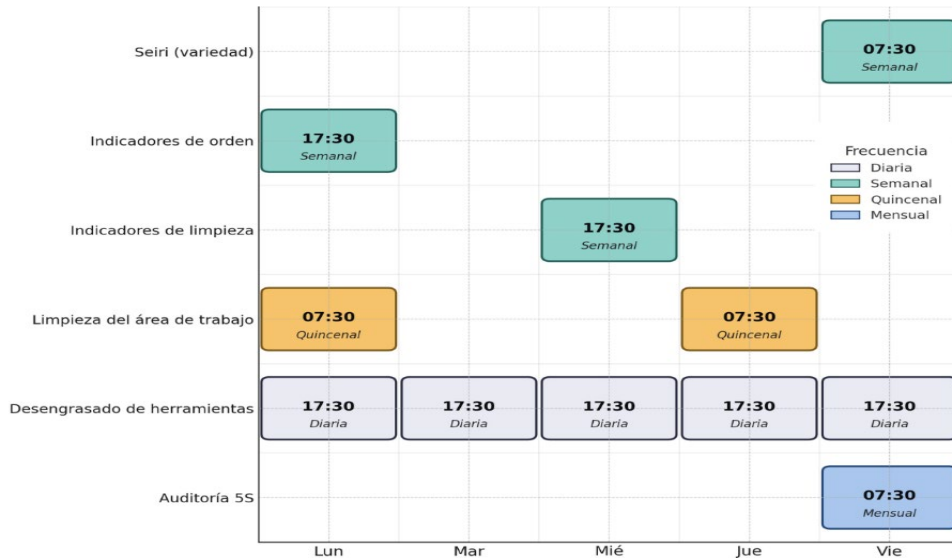
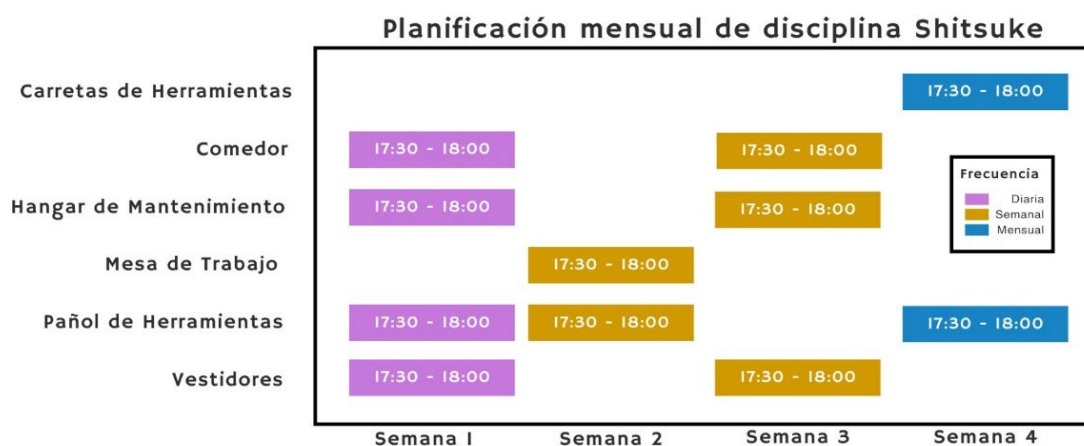


Figura 4. Programa estandarizado de *Seiketsu* en mantenimiento aeronáutico (5S).



Figura 5. Prácticas de gobernanza para la estandarización de *Seiketsu* en 5S.

**Shitsuke:** La fase *Shitsuke* instauró la disciplina necesaria para consolidar las mejoras del ciclo 5S como hábitos permanentes. Cada semana, el equipo revisa las desviaciones detectadas, define las prioridades de la próxima etapa y refuerza los principios de orden y limpieza, dando forma a un cronograma mensual escalonado (Figura 6). Durante las primeras semanas se lleva a cabo limpieza diaria y verificación de pasillos y áreas de trabajo; en las siguientes, se efectúan auditorías de herramientas, reorganización de zonas críticas y comprobación de inventario; finalmente, se realiza una revisión integral del sistema 5S y el mantenimiento de las carretas de soporte. Todas las tareas quedan registradas en el Panel 5S y se validan mediante auditorías quincenales, lo que asegura la trazabilidad de cada acción y facilita la comunicación entre turnos a través de documentación digital.



**Figura 6.** Programación mensual de *Shitsuke* para disciplina y auditoría en el hangar.

## b. Implementación del JIT

En la entidad operadora, la incorporación de JIT tuvo como propósito ajustar los niveles de herramientas y repuestos a las demandas reales de las inspecciones de 100 horas. Para ello se revisó el histórico de consumos de los últimos 12 meses, desagregado por familia de ítems y por ciclo de inspección, y con esa base se fijaron niveles mínimos y máximos calculando el punto de pedido como la demanda durante el lead time más un stock de seguridad equivalente a un ciclo. Se desplegó un Kanban híbrido (tarjeta plastificada con código QR y registro digital espejo) que, al alcanzarse el punto de pedido, genera automáticamente la requisición y notifica a compras. Cada tarjeta contiene ubicación, unidad de medida, nivel mínimo y máximo, proveedor y lote estándar; el escaneo del QR actualiza existencias y traza la orden de reposición. Paralelamente, se acordaron lead times más cortos con proveedores estratégicos y se formó al equipo en gestión visual y reposición por arrastre, con auditorías 5S semanales. La operación diaria se sincronizó con el plan de inspecciones mediante carretas JIT pre abastecidas por turno y una ventana de reposición a primera hora, mientras que el desempeño se siguió con indicadores de servicio como fill rate, rupturas de stock y días de inventario revisados de forma quincenal. A continuación, se detallan los aspectos más relevantes de su despliegue operativo.

**Sobreinventario:** Uno de los primeros frentes de intervención se centró en el exceso de existencias en el pañol: hasta entonces, las herramientas se administraban mediante listados de texto sin control de rotación, lo que saturaba el espacio y ralentizaba las inspecciones de 100 horas. La solución, sintetizada en la Figura 7, implicó migrar toda la información a una base de datos estructurada por categoría funcional, frecuencia de uso y ubicación física; además, se incorporó un semáforo visual (verde = disponible; amarillo = reposición parcial; rojo = pedido inmediato) que activa la orden de compra únicamente al alcanzar el punto de reabastecimiento. Paralelamente, se retiraron los artículos obsoletos, duplicados o de rotación nula, y el stock esencial se reubicó siguiendo los principios 5S, asignando a cada pieza un único soporte rotulado y codificado por

colores. Este rediseño liberó espacio en estanterías, despejó pasillos y redujo en un 45 % el tiempo dedicado a gestionar inventarios, eliminando las interrupciones por faltantes o excedentes de materiales.



Figura 7. Digitalización y control visual del inventario bajo lógica JIT.

**Movilidad:** El segundo despilfarro identificado correspondía a los desplazamientos innecesarios entre el pañol y las aeronaves durante las inspecciones de 100 horas. El DAP de las Tablas 8 y 9 compara el estado previo y posterior a la intervención: inicialmente se registraban 10 traslados, 900 metros recorridos y 27 minutos de espera por búsqueda o préstamo de herramientas; tras implementar estaciones móviles completamente aprovisionadas la tarde anterior, estos valores se redujeron a 6 traslados, 640 metros de recorrido y 10 minutos de espera. Esta preparación JIT redujo la carga operativa de 15 horas-hombre (hh) a 11 hh por ciclo, lo que equivale a una reducción del 26,7 %, eliminó cuellos de botella, despejó pasillos y disminuyó el riesgo de trayectorias cruzadas en el hangar.

**Defectos y Reprocesos:** La evaluación AMFE de la inspección de 100 horas identificó como principal fuente de reprocesos la falta de una guía estandarizada (RPN = 288), seguida de la descalibración del torquímetro (RPN = 96) y del uso de piezas defectuosas (RPN = 84) (Tabla 10) Para atajar este desperdicio, se incorporó una lista de verificación digital sincronizado con el manual de mantenimiento Thrush T34-2: cada punto crítico debe confirmarse antes de avanzar, el sistema impide omisiones de paso y registra sellos temporales inalterables. Al aplicar este formato “en lugar y momento exactos”, se redujeron drásticamente las omisiones de verificación y los desplazamientos al pañol por herramientas olvidadas, integrando la inspección en el flujo continuo que exige JIT. Los registros de hangar de los tres meses posteriores muestran una caída notable de reprocesos por errores de procedimiento, lo que disminuyó la exposición a fallos humanos, redujo el riesgo de daños en sistemas ya ajustados y aumentó la fiabilidad operativa de la aeronave.



**Tabla 8.** DAP de traslados antes de estaciones móviles JIT.

Paso	Categoría	Tiempo (min)	Distancia (m)	Descripción del proceso
1	Almacenamiento	15	5	Preparación de herramientas para la inspección.
2	Transporte	5	5	Transporte de herramientas al área de inspección.
3	Inspección	240	–	Inspección de componentes críticos que se realizan en la inspección de 100 horas.
4	Transporte	10	10	Desplazamiento a otro hangar por herramientas faltantes para la inspección.
5	Espera	15	–	Tiempo de espera por falta de herramientas para continuar con la inspección.
6	Operario	300	–	Mantenimiento de sistemas de la avioneta que se hace en la inspección.
7	Transporte	10	7	Desplazamiento para buscar herramientas en uso por otro técnico.
8	Espera	5	–	Tiempo de espera por falta de herramientas para la inspección.
9	Operario	180	–	Culminación del mantenimiento realizado, verificando el ajuste de los componentes que se realizaron en la inspección.
10	Inspección	120	–	Inspección de verificación para garantizar la correcta operatividad de la avioneta.

**Tabla 9.** DAP de traslados después de estaciones móviles JIT.

Paso	Categoría	Tiempo (min)	Distancia (m)	Descripción del proceso
1	Almacenamiento	5	5	Preparación de herramientas para la inspección.
2	Transporte	5	5	Transporte de herramientas al área de inspección.
3	Inspección	180	–	Inspección de componentes críticos que se realizan en la inspección de 100 horas.
4	Operario	240	–	Mantenimiento de sistemas de la avioneta que se hace en la inspección.
5	Operario	120	–	Culminación del mantenimiento realizado, verificando el ajuste de los componentes que se realizaron en la inspección.
6	Inspección	90	–	Inspección de verificación para garantizar la correcta operatividad de la avioneta.

**Tabla 10.** Análisis AMFE de defectos y reprocesos en la inspección de 100 h (S, O, D y RPN).

Modos de fallo	Efectos	Causas	O	D	RPN
Torquímetro mal calibrado; incorrecto torque aplicado en componentes críticos	Desajuste en los componentes, lo que genera fallos o incluso daños a la aeronave.	Falta de calibración adecuada o mantenimiento inadecuado del torquímetro.	4	4	96
Piezas defectuosas o dañadas que requieren ser reemplazadas nuevamente	Aumento de costos, tiempos operativos y posibles riesgos de seguridad.	Piezas defectuosas provenientes del fabricante o no verificadas adecuadamente.	3	4	84
Falta de una guía estandarizada y detallada para la inspección	La inspección no cubre todos los puntos críticos y se omiten pasos importantes.	Ausencia de una lista de verificación estructurada y detallada.	6	6	288
La aeronave no está correctamente posicionada o nivelada para la inspección, afectando componentes clave	Retrasos en el proceso de inspección debido a la necesidad de reposicionar la aeronave, además de errores en la evaluación de piezas.	No asegurarse de que la aeronave esté correctamente ubicada o nivelada antes de comenzar la inspección.	3	4	72

**Integración JIT en la inspección de 100 h.** La primera fase consistió en sustituir las antiguas listas genéricas por un formato secuencial (Tabla 11) que desglosa minuciosamente los dieciocho sistemas críticos del Thrush S2R-T34, desde hélice y motor hasta tren de aterrizaje y neumática. A continuación, se establece la lista de verificación: cada módulo incluye casillas de validación única que el técnico debe completar antes de continuar, eliminando así cualquier omisión o repetición de pasos. Paralelamente, se habilitaron tres mecanismos interdependientes que dotan de inteligencia JIT al proceso: la validación en el punto de uso impide los saltos de paso y erradica reprocesos; los registros temporales irrevocables, con sello “usuario-hora”, garantizan trazabilidad y responsabilidad individual; y el vínculo automático con el semáforo de inventario actualiza en tiempo real el stock de filtros, lubricantes y recambios, activando la reposición solo cuando el consumo efectivo lo demanda. Durante los tres meses piloto, no se registraron reprocesos por torque incorrecto ni por componentes no conformes, y el tiempo efectivo de inspección se redujo significativamente al suprimir desplazamientos y búsquedas innecesarias.

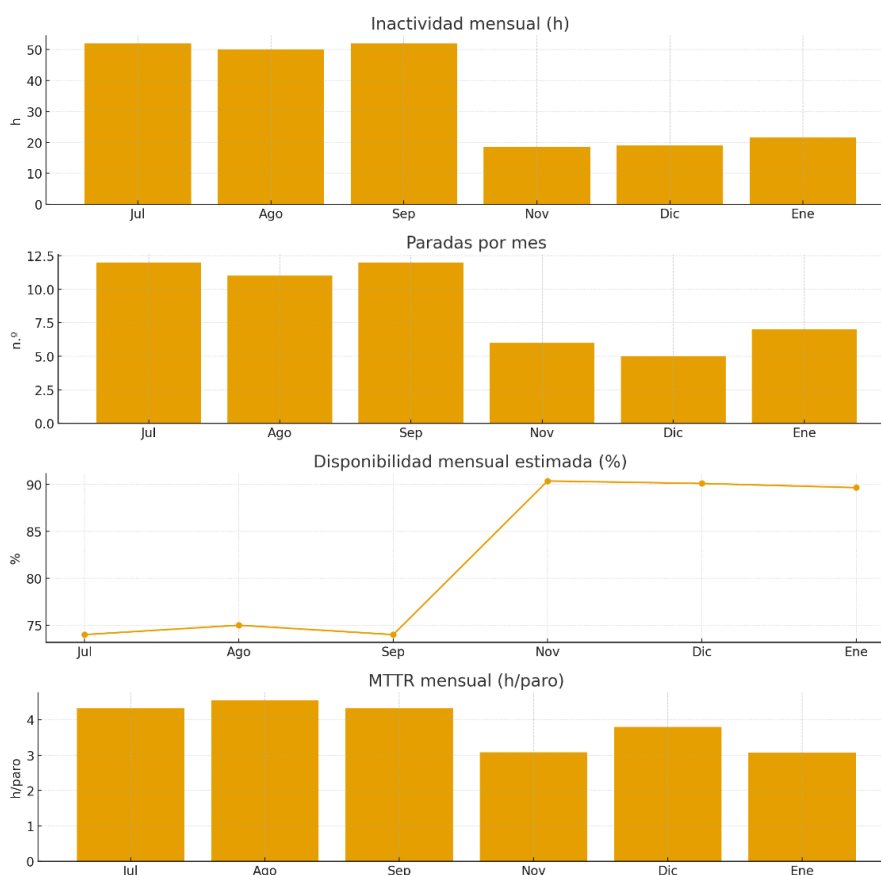
**Tabla 11.** Lista de verificación secuencial JIT para la inspección de sistemas críticos en 100 h.

Parte	Procedimiento de Inspección	Diario	50 h	100 h	400 h
Sistema de Combustible del Fuselaje	Retire, inspeccione, limpie y vuelva a instalar el filtro de combustible principal de 25 micras del fuselaje.			X	
	Vacíe los depósitos de las alas, el colector, los sistemas de ventilación y el separador. Inspeccione el depósito residual “EPA” y tome medidas correctivas si es necesario.	X			
	Encienda la bomba eléctrica de combustible y compruebe si hay fugas en los conductos de combustible.			X	
	Inspeccione los conductos de combustible y los soportes en busca de seguridad y signos de daño o desgaste.			X	
Sistema de Combustible del Fuselaje	Compruebe si hay fugas en la válvula de cierre de combustible en posición abierta y cerrada.			X	
	Compruebe el correcto funcionamiento de los indicadores del depósito de combustible. Agite las alas para verificar la libertad de los punteros.	X			
Tolva	Inspeccione la seguridad y el estado de los deflectores de la tolva.			X	
	Compruebe el estado del cierre y la seguridad de los pestillos de la tapa de la tolva.			X	
	Inspeccione la tolva en busca de fugas y verifique su seguridad.			X	
	Compruebe que la compuerta no presenta fugas y que funciona correctamente.			X	
	Compruebe la corrosión y la seguridad del tubo de ventilación de la tolva.			X	
	Compruebe las juntas de los conductos de retorno y de salida.			X	
	Inspeccione si hay grietas alrededor de las soldaduras en el asa de la compuerta de la tolva y en la varilla de empuje. Verifique el estado de la bota de la varilla de empuje.			X	
	Compruebe si la válvula de cierre de emergencia presenta fugas y funciona correctamente.		X		
Alerones y Flaps	Compruebe el recorrido de las superficies móviles: • Elevador arriba: $27^{\circ} \pm 1^{\circ}$ • Elevador abajo: $17^{\circ} \pm 1^{\circ}$ • Timón: $24^{\circ} \pm 1^{\circ}$ • Tab up: $8^{\circ} \pm 1^{\circ}$ • Lengüeta hacia abajo: $22^{\circ} \pm 1^{\circ}$ .			X	

Parte	Procedimiento de Inspección	Diario	50 h	100 h	400 h
	Compruebe si los contornos de las superficies fijas están deformados debido a un apriete incorrecto de los tirantes.				X
	Inspeccione los puntales en “V” del estabilizador horizontal, los accesorios y los herrajes en busca de seguridad, grietas y corrosión.			X	
	Inspeccione el desgaste de todas las bisagras y sustituya los cojinetes sellados si es necesario.			X	
	Compruebe la seguridad de todos los pasadores.			X	
	Compruebe el estado general de los revestimientos exteriores.			X	
	Compruebe que los orificios de drenaje no estén obstruidos.			X	
Pieles de Fuselaje	Inspeccione todos los paneles y capós en busca de grietas, rozaduras y seguridad de las fijaciones.			X	
	Compruebe la corrosión, el desgaste y la acción de bloqueo de los receptáculos Camloc.			X	
Marco del Fuselaje	Inspeccione los tubos del fuselaje en busca de signos de corrosión o grietas, especialmente alrededor de las soldaduras y en la zona de la bota.			X	
	Compruebe si hay agujeros alargados en los soportes de montaje del motor y en los bellcranks.			X	
	Inspeccione todos los accesorios de fijación del engranaje de resorte, la viga/soporte del engranaje principal y las placas de los extremos de la viga, en busca de seguridad, grietas y corrosión.			X	
	Compruebe el estado de la pintura y repíntela si es necesario.			X	

### c. Indicadores Clave de Rendimiento (KPIs)

Con el propósito de evaluar objetivamente el impacto de las prácticas Lean (5S y JIT) en las inspecciones de 100 horas, se analizaron tres KPIs: MTBF, MTTR y MA. El análisis comparativo abarcó dos lapsos de tres meses, uno previo y otro posterior a la adopción de Lean, e incluyó una exhaustiva depuración y validación de los registros de vuelo y las bitácoras de paradas para garantizar la fiabilidad de los datos. Cada evento registrado se clasificó como mantenimiento preventivo programado (PM) o falla no planificada (F), anotando con precisión su fecha y duración (Figura 8). Para cuantificar la mejora operativa descrita, se calcularon los KPIs MTBF, MTTR y MA según las ecuaciones (2), (3) y (4), empleando los registros de vuelo y de paro exhaustivamente depurados y validados.



**Figura 8.** Comparativa de disponibilidad, inactividad y paradas antes y después de Lean.

Como muestran la Tabla 12 y la Figura 9 (vista general de una aeronave Thrush S2R-T34 durante la inspección de 100 horas), cuyos indicadores fueron calculados con las Ecuaciones (2) a (5), en el primer periodo de tres meses previo a la adopción de Lean las aeronaves CUA, CGC y CTT registraron un MTBF promedio de 13,0 h, un MTTR entre 4,3 y 4,6 h, una MA del 74 a 75 %, y una fiabilidad  $R$  entre 92,3 a 92,9 %, reflejo de averías frecuentes, traslados prolongados en taller y demoras por falta de repuestos. Tras desplegar en octubre el programa Lean, que combinó la reorganización 5S, carretas JIT pre abastecidas y una lista de verificación secuencial, en el periodo subsiguiente de tres meses el MTBF se ubicó entre 26,6 y 29,5 h (aumento del 115 % respecto del valor inicial), el MTTR descendió hasta aproximadamente 3,1 h (reducción del 30 %), la MA alcanzó el 90 % y la  $R$  subió de 3,7 a 4,1 pp. Este aumento de fiabilidad equivale a reducir la tasa de fallas efectiva de  $0,08 \text{ h}^{-1}$  a  $0,034\text{--}0,038 \text{ h}^{-1}$  (50 % menos), y se traduce operacionalmente en unas 120 h-vuelo adicionales por semestre y aeronave.

**Tabla 12.** KPIs de rendimiento (MTBF, MTTR y MA) antes y después de Lean.

Avioneta	MTBF	MTBF	MTTR	MTTR	MA	MA	R	R
	Antes (h)	Después (h)	Antes (h)	Después (h)	Antes (%)	Después (%)	Antes (%)	Después (%)
CUA	13,00	29,49	4,33	3,06	75	90	92,6	96,7
CGC	13,64	28,63	4,55	3,17	75	90	92,6	96,6
CTT	12,55	26,64	4,33	3,07	74	90	92,6	96,3



**Figura 9.** Vista general de una aeronave Thrusch S2R-T34 durante la inspección de 100 horas en el hangar.

#### 4. DISCUSIÓN

La implementación conjunta de herramientas Lean, que incluyó 5S, JIT y un listado de verificación digital secuencial basado en AMFE y DAP, produjo una mejora significativa en la fiabilidad y la disponibilidad de las inspecciones de 100 horas en las aeronaves Thrusch S2R-T34. Antes de la intervención, el MTBF oscilaba entre 12,55 y 13,64 h, el MTTR se situaba entre 4,33 y 4,55 h y la disponibilidad mecánica era del 74 al 75 %. Con la implantación de 5S, la clasificación sistemática y el etiquetado visual redujeron inventario improductivo, tiempos de búsqueda y desplazamientos, y mejoraron la ergonomía del área de trabajo, en línea con la evidencia sobre 5S en operaciones de mantenimiento y servicios técnicos [32]. La lógica JIT, apoyada en carretas pre abastecidas (*kitting*) y semáforos visuales de stock, recortó el tiempo de gestión de repuestos y los movimientos internos, tal como describen las prácticas JIT y de *kitting* para operaciones de mantenimiento y logística [33]. Por su parte, la verificación digital mediante listas de chequeo estructuradas disminuye omisiones y errores humanos, y el AMFE prioriza los riesgos con el número de prioridad de riesgo (RPN) conforme a la norma IEC 60812, asegurando trazabilidad de las acciones correctivas. En conjunto, estas acciones duplicaron el MTBF hasta valores entre 26,64 y 29,49 h, redujeron el MTTR aproximadamente al 30 % (cerca de 3,1 h) y elevaron la disponibilidad al 90 %, resultados consistentes con aplicaciones de enfoques Lean en entornos MRO.

Estas cifras exceden los rangos que suele reportar la literatura para flotas ligeras y activos industriales comparables, donde los programas de mantenimiento predictivo y digitalización consiguen reducciones del tiempo de indisponibilidad del 20–50 % (lo que se traduce en recortes de MTTR en el orden del 20–30 %) y mejoras significativas de la confiabilidad/vida entre fallas (MTBF). En aviación, las revisiones recientes sobre CBM/PHM y Digital MRO documentan que la digitalización del flujo de trabajo (e-logbooks, e-task cards, sensórica y analítica) potencia los beneficios Lean al aportar trazabilidad y exhaustividad etapa por etapa, elevando la disponibilidad y la seguridad operacional. Asimismo, la convergencia de AMFE y DAP con KPI de mantenimiento (p. ej., MTBF, MTTR, disponibilidad) refuerza la solidez del enfoque al proporcionar un marco sistemático para priorizar riesgos y estandarizar la ejecución [34].



Sin embargo, este estudio presenta dos limitaciones principales. La muestra se redujo a tres aeronaves y un único hangar, lo que puede sesgar la inferencia externa, una restricción común en estudios Lean y de transformación operativa que subraya la necesidad de replicación en múltiples contextos industriales [34], [35]. El horizonte de seis meses tampoco permite valorar la sostenibilidad cultural de 5S sin refuerzos continuos, un desafío reportado de forma recurrente para el mantenimiento de 5S en el tiempo [36]. Asimismo, no se efectuó un análisis costo–beneficio detallado, recomendado por la literatura de CBM/PHM y guías oficiales para justificar económicamente cambios de política de mantenimiento [37], [38]. Tampoco se incorporaron criterios tribológicos (fricción y desgaste), clave para evaluar confiabilidad y desempeño a largo plazo en sistemas aeronáuticos y rotodinámicos [39], [40]. En consecuencia, futuras investigaciones deberían ampliar la muestra y el periodo de seguimiento, integrar un estudio económico integral y explorar la adopción de gemelos digitales para avanzar hacia mantenimiento predictivo interoperable en MRO [41], [42].

## 5. CONCLUSIONES

Las inspecciones de 100 horas exigidas por la normativa estadounidense FAA, 14 CFR §91.409 (conforme al FAR Part 43, Apéndice D) se ejecutan de forma adecuada en la flota Thrush S2R-T34. No obstante, la incorporación coordinada de 5S, JIT y un listado de verificación digital respaldado por AMFE y DAP permitió mejorar de manera clara el desempeño del mantenimiento: el MTBF se duplicó ( $\approx +115\%$ ), el MTTR se redujo alrededor de  $30\%$  y la disponibilidad mecánica se elevó hasta  $90\%$ . En términos operativos, la reorganización sistemática del taller disminuyó el inventario improductivo ( $\sim 40\%$ ) y acortó traslados y tiempos de gestión de repuestos ( $\sim 45\%$ ), mientras que la verificación digital eliminó omisiones y reprocesos en las tareas de la inspección reglamentaria.

En consecuencia, el uso de la inspección de 100 horas conforme a la norma, combinado con herramientas Lean y soporte digital, mejora la seguridad, disponibilidad y eficiencia del mantenimiento en aeronaves agrícolas Thrush S2R-T34. Se recomienda institucionalizar el programa (estandarización 5S/*Seiketsu*, checklist digital y seguimiento de KPI) y extenderlo de forma replicable a otras aeronaves y hangares de la organización.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Técnica Estatal de Quevedo y al personal operativo del taller aeronáutico por las facilidades brindadas en el marco del convenio de cooperación institucional, que permitió el acceso a las instalaciones, al hangar, a las aeronaves y a los recursos necesarios para el desarrollo y la validación de esta investigación.

## REFERENCIAS

- [1] H. Chen, Y. Lan, B. K. Fritz, W. C. Hoffmann, y S. Liu, “Review of agricultural spraying technologies for plant protection using unmanned aerial vehicle (UAV),” *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 14, no. 1, pp. 38–49, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211401.5714>
- [2] H. Li, H. Zhu, Z. Jiang, y Y. Lan, “Performance characterization on downwash flow and spray drift of multirotor unmanned agricultural aircraft system based on CFD,” *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 1–8, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20221503.7315>
- [3] L. Witek, “Failure analysis of the wing-fuselage connector of an agricultural aircraft,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 13, no. 4, pp. 572–581, 2006. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.12.029>

- [4] I. Kabashkin, R. Fedorov, y V. Perekrestov, “Decision-making framework for aviation safety in predictive maintenance strategies,” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 3, Feb. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app15031626>
- [5] H. Rivera-Gomez, D. Sanchez-Partida, A. O. Ortega-Reyes, y I. J. Gonzalez-Hernandez, “Optimizing JIT production and maintenance strategies for material management in the presence of quality decline and random demand fluctuations,” *Acta Logistica*, vol. 11, no. 2, pp. 281–292, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.22306/al.v11i2.511>
- [6] W. J. C. Verhagen *et al.*, “Condition-based maintenance in aviation: Challenges and opportunities,” *Aerospace*, vol. 10, no. 9, Aug. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/aerospace10090762>
- [7] F. Khair, M. A. S. Putra, y I. Rizkia, “Improvement and analysis of aircraft maintenance flow process using lean manufacturing, PDCA, PICA, and VSM for sustainable operation system,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1324, no. 1, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1324/1/012071>
- [8] K. Khan *et al.*, “Recent trends and challenges in predictive maintenance of aircraft’s engine and hydraulic system,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 43, Aug. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03121-2>
- [9] S. C. Lee, “A literary survey on the challenges of adopting lean in aerospace production and aviation maintenance,” *Journal of Aviation Technology and Engineering*, vol. 12, no. 1, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.7771/2159-6670.1243>
- [10] M. S. Mahapatra, y D. Shenoy, “Lean maintenance index: A measure of leanness in maintenance organizations,” *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 28, no. 4, pp. 791–809, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1108/JQME-08-2020-0083>
- [11] L. Xu, Y. Zhang, y H. Wang, “Improving civil aviation service risk management with FMEA,” en *Proc. 5th Int. Conf. on Economic Management and Model Engineering (ICEMME)*, pp. 1–6, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.4108/eai.17-11-2023.2342695>
- [12] M. Jasiulewicz-Kaczmarek, y A. Saniuk, “How to make maintenance processes more efficient using lean tools?,” en R. H. M. Goossens (Ed.), *Advances in Social & Occupational Ergonomics*, Cham: Springer, pp. 9–20, 2018. [En línea]. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-60828-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-60828-0_2)
- [13] D. Mendes, H. Navas, y F. Charrua-Santos, “Improving the performance of a conveyor belt through lean philosophy and Industry 4.0,” *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 29, no. 4, pp. 842–862, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1108/JQME-09-2022-0055>
- [14] T. Imanov, M. Yıldız, y E. Koruyucu, “Lean Six Sigma application for aircraft maintenance process,” en T. H. Karakoç, C. Ö. Çolpan, y A. Dalkıran (Eds.), *Progress in Sustainable Aviation*, Cham: Springer, pp. 137–153, 2022. [En línea]. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-12296-5\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-12296-5_8).
- [15] A. Korchagin, Y. Deniskin, I. Pocebneva, y M. Aleksandrovskiy, “Methodology for aviation MRO system management decision-making,” *E3S Web of Conferences*, vol. 376, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337601093>

- [16] A. Korchagin, Y. Deniskin, I. Pocebneva, y O. Vasilyeva, “Lean Maintenance 4.0: Implementation for aviation industry,” *Transportation Research Procedia*, vol. 63, pp. 1521–1533, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.164>
- [17] A. Ceruti, P. Marzocca, A. Liverani, y C. Bil, “Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: The role of augmented reality and additive manufacturing,” *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 516–526, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2019.02.001>
- [18] Aircraft Owners and Pilots Association, “Guide to aircraft inspections,” [En línea]. Disponible en: <https://www.aopa.org/go-fly/aircraft-and-ownership/maintenance-and-inspections/aircraft-inspections>
- [19] Federal Aviation Administration (FAA), *Weight-Shift Control Aircraft Flying Handbook*, FAA-H-8083-5, 2008. [En línea]. Disponible en: [https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aviation/FAA-H-8083-5.pdf](https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/FAA-H-8083-5.pdf)
- [20] E. Wildgrove, *Aircraft Maintenance*, Kindle ed., Oslo, Norway: Publifly AS, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://books.apple.com/pe/book/aircraft-maintenance/id6743449434>
- [21] M. Mazur *et al.*, “Implementation and benefits of the 5S method in improving workplace organisation – A case study,” *Management Systems in Production Engineering*, vol. 32, no. 4, pp. 498–507, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.2478/mspe-2024-0047>
- [22] M. I. A. Wardhani, y T. N. Realita, “5S as a form of lean manufacturing implementation in the perspective of human resources: A case study in food SMEs,” *SOSMANIORA: Jurnal Ilmu Sosial dan Humaniora*, vol. 1, no. 4, pp. 599–605, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.55123/sosmaniora.v1i4.1275>
- [23] I. Stipanovic, S. Skaric Palic, J. Ramon Casas, R. Chacón, E. Ganic, “Inspection and maintenance KPIs to support decision making integrated into digital twin tool,” *CE/Papers*, vol. 6, no. 5, pp. 1234–1241, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/cepa.2137>
- [24] F. Z. Berrabah, C. Belkacemic, y L. Zemmouchi-Ghomari, “Essential and new maintenance KPIs explained,” *International Journal of Education and Management Engineering*, vol. 12, no. 6, pp. 11–20, Dec. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.5815/ijeme.2022.06.02>
- [25] *Asociación Española de Normalización y Certificación*, UNE-EN IEC 60812:2018 (Ratificada). Análisis de los modos de fallo y de sus efectos (AMFE y AMFEC), 2018.
- [26] E. J. De la Cruz Escobedo, y F. A. Ventura Felipe, “Incremento de la productividad de Manantial’s Tito EIRL, perfeccionando los métodos de trabajo y la eficacia en su proceso productivo,” *Impulso (Potosí, Bolivia)*, vol. 3, no. 5, pp. 45–59, Jul. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://revistaimpulso.org/index.php/impulso/article/view/133/207>
- [27] M. U. Danjuma, B. Yusuf, y I. Yusuf, “Reliability, availability, maintainability, and dependability analysis of cold standby series-parallel system,” *Journal of Computational and Cognitive Engineering*, vol. 1, no. 4, pp. 193–200, Abr. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.47852/bonviewJCCE2202144>

- [28] J. Ben, A. O. Mohamed, y K. Muduli, “Effect of preventive maintenance on machine reliability in a beverage packaging plant,” *International Journal of System Dynamics Applications*, vol. 10, no. 3, pp. 50–66, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.4018/IJSDA.2021070104>
- [29] A. Breznická, M. Kohutiar, M. Krbaťa, M. Eckert, y P. Mikuš, “Reliability Analysis during the Life Cycle of a Technical System and the Monitoring of Reliability Properties,” *Systems*, vol. 11, no. 12, Art. no. 556, Dec. 2023, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/systems11120556>
- [30] A. Żyluk, M. Zieja, N. Grzesik, J. Tomaszewska, G. Kozłowski, y M. Jaształ, “Implementation of the Mean Time to Failure Indicator in the Control of the Logistical Support of the Operation Process,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 7, p. 4608, Apr. 2023, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app13074608>
- [31] Thrush Aircraft Inc., Thrush Aircraft S2R-R1340 Maintenance Manual: Single cockpit and dual cockpit, Rev. MM R1340, Albany, GA, USA: Thrush Aircraft Inc., Jan. 1, 2008, 227 pp.
- [32] Shuwandi Sumantri M., Imaduddin Murdifin, Muhammad Syafii, A. Basalamah, and Aryati Arfah, “Reducing waste by implementing lean maintenance approach through the 5S program,” Proc. 2nd IECON—International Conference on Economics and Business, Makassar, Indonesia, 2025, pp. 1–7.
- [33] UNEX Manufacturing, “Warehouse Kitting: Best Practices for Speed, Accuracy & Flexibility,” UNEX Manufacturing Blog. [En línea]. Disponible en: <https://blog.unex.com/warehouse-kitting-best-practices-for-speed-accuracy-flexibility>. Accessed: 7-Oct-2025
- [34] I. Kabashkin, y V. Perekrestov, “Ecosystem of Aviation Maintenance: Transition from Aircraft Maintenance to Platform Health Management,” *Applied Sciences*, vol. 14, no. 11, May. 2024, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app14114394>
- [35] R. R. Alexandre, “*Minimizing Aircraft Maintenance Lead Time Using Lean Thinking*” M.S. thesis, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/30759>
- [36] S. C. Lee, “A Literary Survey on the Challenges of Adopting Lean in Aerospace Production and Aviation Maintenance,” *Journal of Aviation Technology and Engineering*, vol. 12, no. 1, 2023, [En línea]. Disponible en: [doi.org/10.7771/2159-6670.1243](https://doi.org/10.7771/2159-6670.1243).
- [37] R. S. Wagner, T. S. Hattingh, y H. Meijer, “Factors Affecting the Sustainability of Lean in Healthcare: A Systematic Literature Review,” *South African Journal of Industrial Engineering*, vol. 33, no. 3, pp. 124–136, Nov. 2022, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.7166/33-3-2813>.
- [38] S. Kanabar, R. Jirli, S. Katke, y V. K. Jha, “The Impact and Challenges of the Implementation of 5S Methodology in Healthcare Settings: A Systematic Review,” *Cureus*, vol. 16, no. 7, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.7759/cureus.64634>
- [39] N. B. Hölzel, y V. Gollnick, “Cost-benefit Analysis of Prognostics and Condition-based Maintenance Concepts for Commercial Aircraft Considering Prognostic Errors,” in Proc. Annual Conf. of the Prognostics and Health Management Society, 2015, pp. 1–16. [En línea]. Disponible en: <https://papers.phmsociety.org/index.php/phmconf/article/view/2716>

- [40] K. Feldman, T. Jazouli, y P. A. Sandborn, “A Methodology for Determining the Return on Investment Associated With Prognostics and Health Management,” *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 58, no. 2, pp. 305–316, Jun. 2009, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TR.2009.2020134>
- [41] U.S. Department of Defense, *Condition Based Maintenance Plus (CBM+) Guidebook*, Aug. 2024. [Online]. Available: Defense Acquisition University (DAU) website.
- [42] Y. Meng *et al.*, “A Review of Advances in Tribology 2020–2021,” *Friction*, vol. 10, no. 6, pp. 855–904, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40544-022-0685-7>
- [43] T. Liskiewicz, A. Neville, y K. Stępień, “Advances in Sensing for Real-Time Monitoring of Tribological Systems,” *Wear*, vol. 532–533, 205151, 2023, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108965>
- [44] K. Moenck, J.-E. Rath, J. Koch, A. Wendt, F. Kalscheuer, T. Schüppstuhl, y D. Schoepflin, “Digital Twins in Aircraft Production and MRO: Challenges and Opportunities,” *CEAS Aeronautical Journal*, vol. 15, no. 4, pp. 1051–1067, May. 2024, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13272-024-00740-y>

Copyright (2026) © John Cajamarca Guerrero y Rodger Salazar Loo.

Este texto está protegido bajo una licencia internacional [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/). Usted es libre para compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato. También podrá adaptar: remezclar, transformar y construir sobre el material. [Ver resumen de la licencia.](#)





Más artículos científicos aquí