

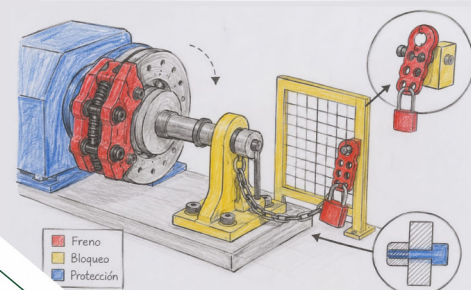
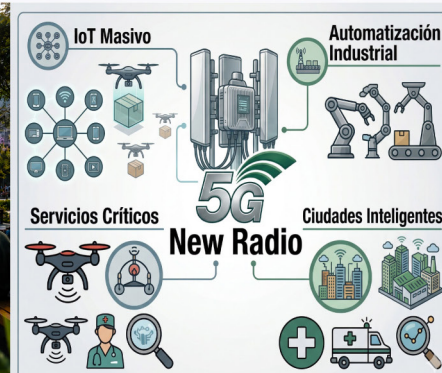


UTEQ
UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE
QUEVEDO

Revista

InGenio

Científica y Tecnológica



eISSN: 2697-3642

Volumen 9, Número 2
Julio 2026

Índice de contenido

Prospectiva de las telecomunicaciones hacia redes 5G en la ciudad de Portoviejo (<i>Prospects for Telecommunications Toward 5G Networks in the City of Portoviejo</i>)	1
Kevin Moreira Arteaga, Gema Medranda Cobeña y Dannyll Zambrano Zambrano.	
Factores de contenido asociados al éxito crítico de videojuegos en la plataforma Steam: un análisis interpretativo mediante Canonical Biplot (<i>Content Factors Associated With the Critical Success of Video Games on Steam: An Interpretative Analysis Using Canonical Biplot</i>).....	21
Ariosto Vicuña Pino y Edwin Pacha-Herrera.	
Experimental Study of Defect Detection in Photovoltaic Panels Using Electroluminescence (<i>Estudio experimental de la detección de defectos en paneles fotovoltaicos utilizando electroluminiscencia</i>)	36
Franklin Gómez López , Danny Ochoa-Correa y Isabel Cabrera Carrera.	
Brechas regulatorias en agua y saneamiento en Ecuador: aplicación de la metodología WASHREG (<i>Regulatory Gaps in Water and Sanitation in Ecuador: Application of the WASHREG Methodology</i>)	46
Sara Barbosa Santacruz, Elizabeth Vargas Zuñiga y Jesús Chavarría Párraga.	
Diseño de sistemas de frenado y bloqueo mecánico en maquinaria industrial para minimizar riesgos durante tareas de mantenimiento (<i>Design of Braking and Mechanical Locking Systems in Industrial Machinery to Minimize Risks During Maintenance Tasks</i>).....	67
Luis Jácome Alarcón, Yuliana León Quiñonez, Karen Almeida Rivera y Rubén Romero Giler	
Análisis de la relación entre el IPC y el PIB per cápita en Ecuador (2000–2024): Un enfoque de modelado estadístico y predicción (<i>Analysis of the Relationship Between CPI and GDP Per Capita in Ecuador (2000– 2024): A Statistical Modeling and Prediction Approach</i>).....	79
Walter Jácome-Vélez, Jeyson Egas García, Andrea Abad-Echeverría y David Cárdenas-Vera.	
Crecimiento y concentración territorial del internet fijo en Ecuador: comparación provincial 2024-2025 (<i>Growth and Territorial Concentration of Fixed Broadband Internet in Ecuador: A Provincial Comparison, 2024-2025</i>)	96
Karen Estacio Corozo.	
PV Integration and Emission Offsets in a Campus Data Center: Evidence from Seven Years of Operation (<i>Integración fotovoltaica y compensación de emisiones en un centro de datos universitario: evidencia de siete años de operación</i>)	107
Danny Ochoa-Correa y Emilia Sempértégui-Moscoso.	
Uso de espacios públicos urbanos en Quito postpandemia: calidad, percepción y diseño (<i>Urban Public Space Use in Quito in the Post-Pandemic Context: Spatial Quality, User Perception, and Urban Design</i>)	121
Mauricio Leonel Mendoza Riofrio.	

Prospectiva de las telecomunicaciones hacia redes 5G en la ciudad de Portoviejo

(Prospects for Telecommunications Toward 5G Networks in the City of Portoviejo)

Kevin Leonardo Moreira Arteaga, Gema Isabel Medranda Cobeña, Dannyll Michelle Zambrano Zambrano
Universidad Técnica de Manabí
kmoreira0138@utm.edu.ec | gema.medranda@utm.edu.ec | michellc.zambrano@utm.edu.ec

Resumen: La ausencia de infraestructura 5G en Portoviejo limita su competitividad regional y contradice los objetivos de conectividad universal del Estado ecuatoriano. Esta investigación diseñó una estrategia de despliegue progresivo de red 5G RAN mediante ingeniería aplicada en dos fases: una auditoría técnico-regulatoria basada en el catastro de ARCOTEL y ordenanzas municipales, seguida del diseño arquitectónico de transición desde NSA Option 3x hacia SA Option 2, conforme a estándares internacionales. Los resultados evidenciaron una brecha de cobertura del 31 % y la inexistencia de nodos 5G operativos, aunque los 448 eNodeB 4G existentes podrían reutilizarse como anclas NSA. Sin embargo, las normativas municipales vigentes generan ciclos de despliegue entre 2 y 4 veces más lentos que en países como Brasil y Colombia. El estudio propone una hoja de ruta a cinco años y una metodología replicable para los GAD municipales, ofreciendo un framework ejecutable para la modernización de la política pública local.

Palabras clave: 5G RAN, desarrollo urbano, brecha digital, política pública, arquitectura NSA/SA.

Abstract: The absence of 5G infrastructure in Portoviejo limits its regional competitiveness and contradicts the universal connectivity objectives of the Ecuadorian State. This research designed a progressive 5G RAN network deployment strategy through applied engineering in two phases: a technical-regulatory audit based on the ARCOTEL registry and municipal ordinances, followed by the architectural design of the transition from NSA Option 3x to SA Option 2, in accordance with international standards. The results showed a coverage gap of 31% and the lack of operational 5G nodes, although the 448 existing 4G eNodeBs could be reused as NSA anchors. However, current municipal regulations generate implementation cycles between 2 and 4 times slower than in countries such as Brazil and Colombia. The study proposes a five-year roadmap and a replicable methodology for municipal GADs, offering an executable framework for the modernization of local public policy.

Keywords: 5G RAN, urban development, digital divide, public policy, NSA/SA architecture.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de las telecomunicaciones es fundamental en la era digital, ya que impulsa la conectividad universal, la innovación industrial y el desarrollo sostenible de las ciudades inteligentes. La tecnología 5G emerge como un factor transformador en el desarrollo urbano, habilitando servicios como hiperconectividad para Internet de las cosas (IoT) masiva, baja latencia para aplicaciones críticas (medicina remota, automatización industrial) y mayor capacidad para big data, alineándose con los ejes estratégicos de infraestructura digital y ciberseguridad de la Agenda de Transformación Digital 2022-2025 del MINTEL en Ecuador.

La quinta generación de redes móviles (5G RAN (Radio Access Network)) ha trascendido su rol como un exclusivo canal de comunicación para convertirse en la plataforma habilitadora de la Cuarta Revolución Industrial. Al desagregar funcionalidades entre unidades de radio y distribuidas bajo arquitecturas abiertas (O-RAN), el 5G RAN permite servicios críticos como la Banda Ancha Móvil Mejorada (eMBB) y las Comunicaciones Ultra Confiables de Baja Latencia (uRLLC) [1], [2].

Sin embargo, la transición hacia estos ecosistemas presenta desafíos arquitectónicos significativos: mientras que el modelo No Autónomo (NSA) facilita un despliegue rápido apoyándose en núcleos 4G, solo la Arquitectura Autónoma (SA) desbloquea el verdadero potencial para el desarrollo de Ciudades Inteligentes (Smart Cities) y el Internet de las Cosas masivo (mMTC) [3], [4].

Esta dualidad arquitectónica es crítica para ciudades intermedias en economías en desarrollo, donde la brecha digital amenaza con estancar la competitividad regional. El caso de estudio de esta investigación es Portoviejo, capital de la provincia de Manabí, Ecuador, por ser la capital de la tercera provincia con más población del país.

A pesar de su dinamismo económico, la ciudad carece de infraestructura 5G, una limitación estructural ratificada por los informes de la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL) [5]. Esta carencia no solo impide la gestión avanzada de servicios críticos como la respuesta ante desastres sísmicos mediante telepresencia y computación perimetral [6] sino que contradice los objetivos de conectividad universal del Estado. En Ecuador, la Ley Orgánica para la Transformación Digital y Audiovisual establece como prioridad nacional el fomento de la inversión en infraestructura y la simplificación regulatoria para cerrar la brecha tecnológica [7].

La Agenda de Transformación Digital 2022-2025, impulsada por el MINTEL, establece siete ejes estratégicos, que se ilustran en la figura 1, abarcando desde la infraestructura digital hasta la ciberseguridad, los cuales exigen a los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) a modernizar sus redes [8], [9]. Sin embargo, existe una desconexión crítica: aunque el Plan Nacional de Telecomunicaciones exige adoptar nuevas tecnologías [10], Portoviejo carece de una hoja de ruta técnica que articule estos mandatos legales con un plan de migración viable.



Figura 1. Ejes estratégicos de MINTEL.

La viabilidad técnica de esta propuesta se sustenta en el cumplimiento riguroso de los estándares internacionales de interoperabilidad y evolución de red. Específicamente, el modelo de transición adopta las especificaciones del 3GPP Release 15, que estandariza la evolución desde la arquitectura Option 3 (NSA) hacia la Option 2 (SA) [11].

Asimismo, los indicadores de desempeño proyectados se alinean con la recomendación ITU-R M.2083 para redes IMT-2020 [12], asegurando que la infraestructura desplegada cumpla con

los estándares globales de calidad de servicio requeridos para aplicaciones de misión crítica y se ejecute bajo las guías de migración de la GSMA [13].

El objetivo de este estudio es diseñar una estrategia de despliegue progresivo de la red 5G RAN para Portoviejo, que cumpla tanto con los requisitos técnicos de O-RAN como con el marco jurídico nacional. Se propone un modelo escalonado que inicie con arquitectura NSA para la provisión inmediata de eMBB, evolucionando hacia un núcleo SA que soporte la gobernanza digital exigida por la agenda nacional [14].

La contribución principal de este artículo es demostrar un despliegue planificado de 5G RAN en Portoviejo aprovechando sus 448 eNodeB 4G existentes (ARCOTEL). Este enfoque cierra la brecha de cobertura del 31 % y se alinea con los lineamientos de MINTEL sobre espectro en la banda de 3,5 GHz y la transición 5G. En particular, la arquitectura NSA-SA constituye el mecanismo indispensable para cumplir con la Agenda 2030, al garantizar resiliencia operativa y el derecho constitucional urbano a las TIC [15].

2. TRABAJOS RELACIONADOS

La literatura académica reciente coincide en que la transición hacia 5G no es simplemente una mejora incremental de velocidad, sino un rediseño arquitectónico orientado a soportar la masividad del IoT y servicios críticos mediante tecnologías habilitadoras como ondas milimétricas (mmWave), SDN y NFV [3], [16].

Autores como [17] destacan que esta convergencia tecnológica permite gestionar requisitos heterogéneos, desde entretenimiento hasta control industrial. Asimismo, la dimensión de sostenibilidad ha cobrado protagonismo; [18] revela que el 42 % de las investigaciones actuales priorizan el impacto ambiental y la eficiencia energética sobre los aspectos puramente económicos, estableciendo un nuevo estándar para los despliegues modernos.

En el contexto ecuatoriano, el despliegue se encuentra en una etapa incipiente, pero normada. Mientras que ARCOTEL ha iniciado la planificación del espectro, la información pública sobre la cobertura real sigue siendo limitada [5]. No obstante, el marco regulatorio se ha fortalecido con la Agenda de Transformación Digital del MINTEL [19], la cual legitima los proyectos de modernización en ciudades intermedias al establecer la inclusión digital y el cierre de la brecha territorial como objetivos de Estado, proporcionando el respaldo jurídico necesario para iniciativas locales.

Al analizar los estudios de implementación en ciudades ecuatorianas, se evidencian enfoques metodológicos diversos. Por un lado, investigaciones en Guayaquil [20] se han centrado en la percepción social y la adopción multisectorial, concluyendo que el éxito de 5G depende tanto de la infraestructura como de la sensibilización ciudadana.

Por otro lado, estudios en Quito [21] y Lomas de Sargentillo [22] han adoptado un enfoque estrictamente ingenieril, validando mediante simulaciones (Atoll, WinProp) la viabilidad técnica de arquitecturas NSA y el uso de beamforming para mejorar la QoS en entornos urbanos y rurales respectivamente [23]. Sin embargo, estos antecedentes presentan limitaciones al aplicarse a ciudades con características históricas como Portoviejo.

Como advierte [21] en su análisis sobre Quito, el despliegue en zonas patrimoniales exige soluciones discretas que equilibren la modernización con la preservación estética, un desafío que los modelos puramente técnicos a menudo pasan por alto. La presente investigación busca llenar este vacío, integrando la planificación técnica rigurosa [21] con el cumplimiento normativo [24] y las consideraciones urbanas específicas para una ciudad intermedia en desarrollo.

3. METODOLOGÍA

La investigación se estructura bajo un diseño de ingeniería aplicada, centrada en la planificación de redes de nueva generación. El estudio operacionaliza variables técnicas y regulatorias para modelar una estrategia de migración tecnológica 5G en escenarios de infraestructura limitada.

Procedimiento

La ejecución del estudio se sistematizó en dos fases operativas, cada una regida por un marco normativo específico para garantizar la replicabilidad y validez del modelo propuesto para la ciudad de Portoviejo en la provincia de Manabí.

Fase I: Auditoría técnica y regulatoria

Se estableció la brecha digital contrastando la infraestructura instalada (nodos eNodeB del catastro ARCOTEL) frente a las metas de la Agenda MINTEL 2022-2025. Asimismo, se evaluó el cumplimiento de cobertura en zonas urbanas y rurales, y se analizaron las ordenanzas municipales para identificar barreras normativas al despliegue y densificación 5G.

Fase II: Diseño de arquitectura de transición

Se modeló la hoja de ruta técnica alineada con los estándares 3GPP Release 15 e ITU-R M.2083. Se definió un escenario inicial NSA Option 3x que utiliza 4G (1900/2100 MHz) como ancla y 5G NR (3,5 GHz) para optimizar el CAPEX, proyectando la migración hacia una arquitectura SA que garantice latencias inferiores a 10 ms y densidad masiva para IoT. Esto valida previamente la disponibilidad de bloques contiguos en la banda C (3,3-3,6 GHz), conforme al CNAF.

Materiales y marco de referencia

El diseño de la propuesta se fundamentó en:

- **Estándares de ingeniería:** Se adoptaron las especificaciones del 3GPP Release 15 [11] para la definición de interfaces de red y la recomendación ITU-R M.2083 para el establecimiento de KPIs objetivo, como tasa de datos pico y latencia en el plano de usuario.
- **Instrumentos regulatorios:** Se procesaron como insumos mandatorios la Ley Orgánica de Transformación Digital y la Agenda MINTEL 2022-2025 [19], alineando la arquitectura propuesta con los ejes de infraestructura digital y ciberseguridad nacional.
- **Recolección de datos:** La validación del escenario base se sustentó en la extracción y procesamiento de datos de tres fuentes primarias:
 - ✓ **Repositorios oficiales:** Se extrajo información de asignación de espectro y catastro de radiobases del Oficio Nro. ARCOTEL-CCON-2025-0875-OF, el Plan de Servicio Universal, la Agenda MINTEL 2022-2025 [19], páginas oficiales del gobierno ecuatoriano, la Ley Orgánica de Transformación Digital [7], y normativas internacionales como 3GPP Release 15 [11] e ITU-R M.2083 [12].
 - ✓ **Métricas de crowdsourcing (QoE):** Se analizaron reportes de Calidad de Experiencia (QoE) y mapas de calor de cobertura mediante la plataforma nPerf, permitiendo georreferenciar zonas de sombra y validar la inexistencia de portadoras 5G activas en la provincia de Manabí.
 - ✓ **Bases de datos especializadas:** Se ejecutó una revisión sistemática de artículos para identificar topologías de red validadas en ciudades intermedias con características orográficas similares a la zona de estudio.

4. RESULTADOS

La investigación permitió generar hallazgos estructurados en tres dominios complementarios: el diagnóstico de la infraestructura existente, la identificación de barreras regulatorias municipales, y el diseño de la arquitectura de transición hacia 5G RAN.

4.1. Auditoría de infraestructura actual

El levantamiento de línea base mediante el catastro oficial de ARCOTEL observado en la Tabla 1 evidenció la distribución tecnológica de las radiobases desplegadas en la provincia de Manabí. Según las estadísticas a noviembre de 2024 detalladas en la Tabla 1 la región cuenta con 595 estaciones 2G (GSM), 854 estaciones 3G (UMTS) y 448 estaciones 4G (LTE), con cero radiobases 5G NR operativas.

Tabla 1. Distribución de radiobases por operador y tecnología en Manabí (noviembre 2024).

Operador	GSM 850	UMTS 1900	LTE 700	LTE AWS	Total 4G	5G NR
CONECEL (Claro)	196	264	4	190	194	0
OTECCEL (Movistar)	194	283	149	0	149	0
CNT EP	205	307	105	0	105	0
Total provincial	595	854	258	190	448	0

Fuente: Catastro ARCOTEL, Oficio Nro. ARCOTEL-CCON-2025-0875-OF [25].

La validación mediante la plataforma de crowdsourcing nPerf confirmó la inexistencia de portadoras 5G activas en Portoviejo, registrándose únicamente cobertura 2G, 3G y 4G por parte de los tres operadores del Servicio Móvil Avanzado.

4.2. Análisis de cumplimiento regulatorio

La Figura 2 muestra el contraste entre la cobertura actual y las metas del Plan de Servicio Universal 2022-2025, lo que revela brechas significativas que afectan directamente al cantón Portoviejo.

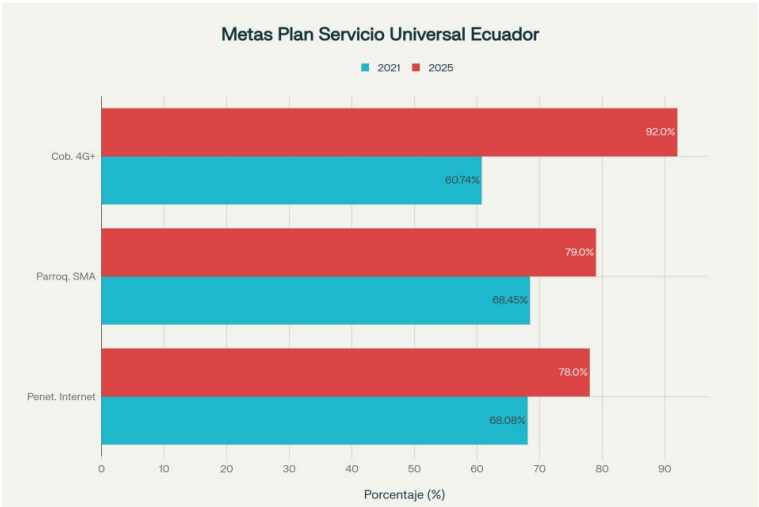


Figura 2. Metas del plan de servicio universal Ecuador 2022-2025: Línea base vs meta proyectada. Fuente: MINTEL [10].

Tabla 1. Indicadores del plan de servicio universal Ecuador 2022-2025.

Indicador	Línea Base 2021	Meta 2025	Brecha
Cobertura poblacional 4G o superior	60,74 %	92,00 %	+31,26 pp
Parroquias rurales con SMA	68,45 %	79,00 %	+10,55 pp
Penetración Internet móvil y fijo	68,08 %	78,00 %	+9,92 pp

Fuente: Plan de servicio universal MINTEL 2022-2025 [10].

El Plan Nacional de Telecomunicaciones 2024-2025, mostrado en la Tabla 2, establece como meta específica "incrementar el porcentaje de cobertura poblacional con tecnología 4G de 78,08 % en el año 2022 a 80,00 % al 2025", evidenciando que la transición hacia 5G aún no forma parte de los indicadores oficiales de cumplimiento estatal.

4.3. Barreras de despliegue identificadas

El análisis de las ordenanzas municipales vigentes del GAD Portoviejo identificó las restricciones críticas para la densificación requerida por las redes 5G RAN. Estas se detallan en la Tabla 3.

Tabla 2. Restricciones municipales de Portoviejo para infraestructura de telecomunicaciones.

Restricción	Normativa	Impacto en densificación 5G
Zonas prohibidas	Art. 6, Ordenanza Espacio Público	Monumentos históricos, áreas patrimoniales, SNAP, márgenes del río (50 m)
Altura máxima urbana	Art. 7, literal a)	60 metros desde nivel de acera
Altura máxima rural	Art. 7, literal b)	80 metros desde nivel de suelo
Permiso implantación	Art. 12-15	Vigencia anual renovable
Mimetización obligatoria	Art. 6, 9	Integración visual al entorno
Seguro responsabilidad civil	Art. 11	50 SBU por estación
Soterramiento preferente	Plan Nacional MINTEL	12,35 km programados 2024

Fuente: Consejo Municipal del GAD Portoviejo [27]

Las tasas municipales por ocupación del espacio público representan un factor de costo operativo significativo: USD 0,02 por metro lineal diario para cables aéreos y USD 0,008 para cables soterrados, además de un 10 % del SBU diario por cada antena celular. La Figura 3 muestra una red 5G densificada que requiere extensos tendidos de fibra óptica fronthaul, lo que genera una acumulación sustancial de estos costos.

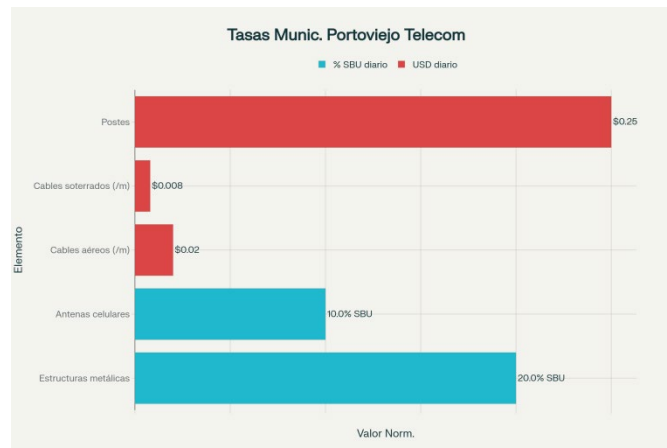


Figura 3. Tasas municipales de Portoviejo para ocupación de espacio público con infraestructura de telecomunicaciones.

4.4. Validación de espectro radioeléctrico

La verificación del Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) confirmó en la Tabla 4 la disponibilidad del espectro requerido para el despliegue 5G NR (New Radio).

Tabla 3. Bandas de frecuencia para despliegue 5G en Ecuador.

Banda	Rango (MHz)	Estado actual	Rol en arquitectura 5G
700 MHz (APT)	703-803	LTE activo	Cobertura rural, reutilizable 5G NR
1900 MHz (PCS)	1850-1990	UMTS/LTE	Banda ancla NSA Option 3x
AWS (2100)	1710-2155	LTE	Banda ancla NSA Option 3x
Banda C (3,5 GHz)	3300-3600	FWA (CNT: 50 MHz)	Banda primaria 5G NR
mmWave (26 GHz)	24250-27500	Sin asignación	Hotspots urbanos (futuro)

Fuente: CNAF Ecuador, Resoluciones ARCOTEL 2021-2025 [28]

CNT EP dispone de 50 MHz de espectro radioeléctrico asignado a nivel nacional en la banda de 3,4 – 3,6 GHz, inicialmente destinada a servicios de acceso inalámbrico fijo (FWA). Actualmente, la empresa ha tramitado ante la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL) la solicitud de cambio de uso de dichas frecuencias para su operación comercial en tecnología 5G. En este contexto, ARCOTEL aprobó en diciembre de 2024 las bases del proceso público competitivo para la asignación de espectro 5G mediante la Resolución ARCOTEL-2024-299, estableciendo así el marco habilitante para el despliegue nacional de esta tecnología.

La brecha tecnológica en la provincia de Manabí responde a factores económicos, técnicos y regulatorios de alcance local. Económicamente, Guayas y Pichincha concentran el 61 % de las conexiones del país, orientando las inversiones de las operadoras hacia estas provincias, donde se registra mayor densidad de usuarios.

Quito (180 sitios 5G, 65 % de cobertura) y Guayaquil (142 sitios, 58 %) lideran desde octubre de 2025 con CNT y Claro, mientras Portoviejo mantiene 0 % de cobertura pese a contar con 448 eNodeB 4G reutilizables y USD 584 millones invertidos a nivel nacional. La brecha no es técnica (la infraestructura está lista) ni económica (las inversiones están confirmadas), sino puramente centralista: el MINTEL prioriza las capitales y las ordenanzas municipales de 2015 duplican los tiempos de despliegue en comparación con las ciudades principales.

El componente regulatorio constituye un factor estructural en este escenario. Mientras ciudades como Quito actualizaron su normativa sobre soterramiento y despliegue de infraestructura en 2022, Portoviejo mantiene ordenanzas vigentes desde 2015 que establecen tasas equivalentes al 10 % del Salario Básico Unificado diario por antena.

Este marco normativo incrementa significativamente los costos de implementación, especialmente para redes 5G, cuyo diseño requiere una mayor densidad de antenas de menor tamaño (small cells). En consecuencia, el rezago tecnológico del cantón se vincula principalmente a condiciones de gobernanza local y a limitaciones asociadas a la economía de escala.

4.5. Diseño de arquitectura de transición

Con base en los resultados de la auditoría, la Figura 4 muestra el diseño de la arquitectura de migración siguiendo las especificaciones 3GPP Release 15 [11].

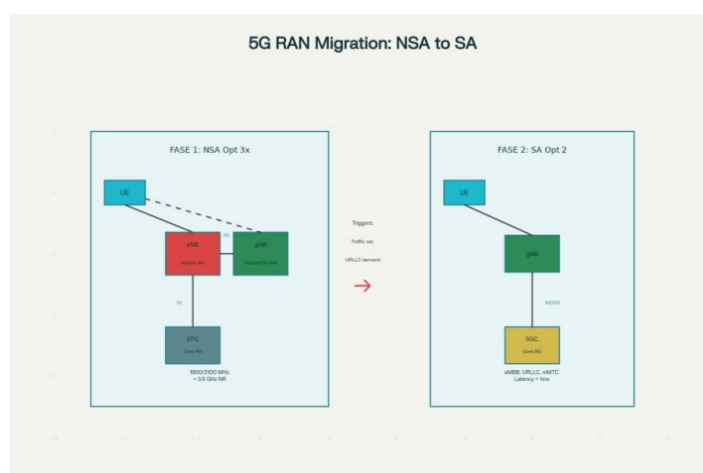


Figura 4. Arquitectura de transición 5G RAN: de NSA (Option 3x) a SA (Option 2) según 3GPP Release 15 [11].

Arquitectura NSA option 3x (fase inicial)

La selección de option 3x se fundamenta en sus ventajas operativas para contextos con infraestructura 4G existente, en la Tabla 5 se explica parámetros claves entre las 2 tecnologías:

- El eNB (4G) actúa como Master Node (MN), manteniendo el plano de control conectado al EPC.
- El gNB (5G NR) actúa como Secondary Node (SN), conectado via interfaz X2.
- Los datos del usuario fluyen directamente desde el EPC hacia el gNB, evitando sobrecarga en el eNB.
- Las bandas 1900 MHz y AWS (2100 MHz) funcionan como anclas de control.
- La banda 3,5 GHz soporta las portadoras 5G NR para servicios eMBB.

Tabla 4. Comparativas arquitecturas 5G: NSA Option 3x vs SA Option 2.

Parámetro	NSA Option 3x	SA Option 2
Estándar 3GPP	Release 15	Release 15/16
Core Network	EPC (4G)	5GC (5G)
Nodo Maestro	eNB (4G)	gNB (5G)
Interfaz RAN	X2	N2/N3, Xn
Latencia mínima	~10-15 ms	<1 ms (URLLC)
Network Slicing	Limitado	Completo
Casos de uso	eMBB	eMBB, URLLC, mMTC
CAPEX inicial	Bajo	Alto
Tiempo despliegue	6-12 meses	18-24 meses

Fuente: Especificaciones 3GPP TR 38.912, GSMA Implementation Guidelines [11]

KPIs objetivo según ITU-R M.2083

La arquitectura propuesta debe alcanzar los siguientes indicadores detallados en la Tabla 6 correspondientes al desempeño establecidos por la UIT para redes IMT-2020.

Tabla 5. Requisitos de desempeño IMT-2020 para 5G.

Parámetro	Requisito	Escenario
Tasa de datos pico (DL)	20 Gbps	eMBB
Tasa de datos pico (UL)	10 Gbps	eMBB
Latencia plano de usuario	4 ms (eMBB), 1 ms (URLLC)	Todos
Densidad de conexión	10 ⁶ dispositivos/km ²	mMTC
Eficiencia espectral pico	30 bps/Hz (DL)	eMBB
Fiabilidad	99,999% (1-10 ⁻⁵)	URLLC
Densidad de tráfico	10 Mbps/m ²	eMBB

Fuente: Recomendación UIT-R M.2083-0 [12].

4.6. Hoja de ruta propuesta

El modelo de transición se muestra en la Figura 5 y se estructura en tres fases secuenciales, con disparadores de migración basados en métricas de saturación de tráfico.

Roadmap 5G RAN Portoviejo

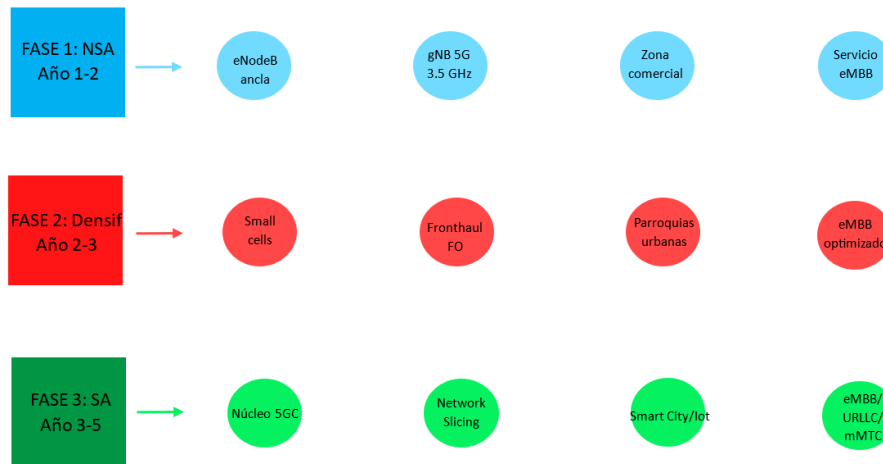


Figura 5. Hoja de ruta propuesta para el despliegue progresivo de 5G RAN en Portoviejo (2025-2030).

Tabla 6. Cronograma de implementación 5G RAN Portoviejo.

Fase	Período	Arquitectura	Actividades clave	Servicios
1	Año 1-2	NSA Option 3x	Identificación eNodeB ancla (bandas 1900/AWS), instalación gNB 3,5 GHz, cobertura zona comercial y administrativa	eMBB
2	Año 2-3	NSA densificada	Despliegue small cells, extensión fronthaul FO (12,35 km soterrados), parroquias urbanas	eMBB optimizado
3	Año 3-5	SA Option 2	Implementación núcleo 5GC, migración eNB→ng-eNB, habilitación Network Slicing	eMBB, URLLC, mMTC

El cronograma de la Tabla 7 detalla una evolución de 5 años en Portoviejo, transitando de una arquitectura híbrida (NSA) inicial hacia una red 5G autónoma (SA) con núcleo propio. Esta modernización final habilita servicios críticos y masivos (URLLC y mMTC) mediante la implementación de Network Slicing y la expansión de fibra óptica.

Triggers de migración NSA→SA:

- Saturación de tráfico >80 % en celdas ancla.
- Demanda de servicios URLLC (telemedicina, automatización industrial).
- Despliegue de aplicaciones Smart City por el GAD Portoviejo.
- Disponibilidad de espectro adicional en banda C post-proceso competitivo ARCOTEL.

4.7. Selección de nodos candidatos

Para la fase 1, se identificaron como candidatos prioritarios los eNodeB 4G ubicados en las siguientes zonas de Portoviejo, considerando densidad poblacional, demanda de tráfico y factibilidad de acceso para instalación de equipos gNB:

Tabla 7. Criterios de selección para nodos ancla NSA.

Criterio	Ponderación	Justificación
Cobertura LTE existente	25 %	Estabilidad del enlace de control
Densidad poblacional	20 %	Maximizar usuarios beneficiados
Proximidad a fibra óptica	20 %	Viabilidad de fronthaul
Ausencia de restricciones municipales	15 %	Factibilidad regulatoria
Capacidad de infraestructura civil	10 %	Espacio para equipos gNB
Alimentación eléctrica	10 %	Capacidad para nuevos equipos

Tabla 8. Evaluación técnica de fibra óptica para 5G.

Parámetros críticos	Infraestructura actual	Requisito 5G (3GPP/ITU)	Cumplimiento	Acción correctiva	CAPEX estimado
Capacidad eCPRI	GPON 2,5-10 Gbps (CNT 82 %)	10-25 Gbps divididos 7,2	65 %	Actualización DWDM 100G	USD 450 mil
Fronthaul de latencia	45-200 μ s (1-18 km nPerf)	$\leq 100 \mu$ s E2E	Parcial	FO dedicada < 10 km	USD 800 mil
Jitter máximo	25-150 μ s	URLLC de $\leq 20 \mu$ s	No cumple	IEEE 1588v2 PTP	USD 250 mil
Distancia óptima	5-18 km un eNodeB	≤ 10 km (HARQ)	Superar el 40 %	+22 km FO prioritaria	1,2 millones de dólares
Sincronización	SyncE básica	PTP de 130 ns (FR2)	No cumple	Gran maestro GNSS+PTP	USD 180.000
Cobertura de células pequeñas	12,35 km subterráneos (2024)	35 km requeridos urbano	35%	Densidad 22 km Plan Nacional	USD 950 mil
Costo municipal	USD 0,008/m subterráneo	---	Alto	Negociar exención de celdas pequeñas	---

Fuente: Plan Nacional de Soterramiento y Ordenamiento 2024 [26]

La aplicación de los criterios de la Tabla 8 permitirá priorizar los sitios óptimos para el despliegue inicial, maximizando el retorno de inversión y minimizando los tiempos de implementación conforme a las guías de la GSMA para despliegues NSA.

4.8. Evaluación de infraestructura de fibra para latencia 5G

CNT EP reporta cobertura GPON al 82 % de hogares en Portoviejo (2024), con velocidades simétricas hasta 2,4 Gbps/1,2 Gbps y latencia típica de 45-85 μ s en enlaces <8 km. CELEC EP ensamblado 124 km OPGW (fibra óptica embebida en cables de alta tensión) en el corredor Quevedo-Daule-Peripa-Portoviejo (2023), disponible para backhaul. Sin embargo, el Plan Nacional de Soterramiento asigna solo 12,35 km para densificación urbana en 2024-2025, insuficiente para los ~35 km requeridos por el fronthaul 5G [26]. Evaluación técnica de fibra óptica de parámetros detallados en la Tabla 9.

4.9. Requisitos de fronthaul para la densificación 5G

La densificación requerida por las redes 5G RAN impone requisitos significativamente más exigentes sobre la infraestructura de transporte fronthaul. El análisis técnico reveló los siguientes parámetros críticos detallados en la Tabla 10 para el despliegue en Portoviejo.

Tabla 10. Requisitos de fronthaul por tecnología de acceso.

Parámetro	LTE (4G)	5G NR (3,5 GHz)	5G NR mmWave	Observación
Capacidad fronthaul/celda	2,5-10 Gbps	10-25 Gbps	25-100 Gbps	eCPRI reduce ~10× vs CPRI
Latencia máxima fronthaul	150-200 μ s	100 μ s	75 μ s	Crítico para HARQ/CoMP
Distancia máxima fibra	15-20 km	10-15 km	5-10 km	Limitada por latencia
Protocolo recomendado	CPRI	eCPRI	eCPRI	Split 7,2 recomendado
Sincronización	$\pm 1,5$ μ s	± 130 ns	± 65 ns	IEEE 1588 PTP

Fuente: Análisis basado en estándares 3GPP y literatura técnica [11].

La Figura 6 muestra la evolución del protocolo CPRI hacia eCPRI (enhanced CPRI) que representa un factor habilitante crítico para la densificación 5G. Mediante la implementación de split funcional 7,2, eCPRI reduce los requisitos de capacidad del fronthaul hasta en un orden de magnitud, permitiendo reutilizar infraestructura de fibra óptica existente para el despliegue de antenas MIMO masivo.

El Plan Nacional de Soterramiento establece para Portoviejo una meta de 12,35 km de redes soterradas para 2024, infraestructura que puede ser aprovechada para el tendido de fibra óptica fronthaul. Sin embargo, la ordenanza municipal establece tasas de USD 0,008/metro lineal diario para cables soterrados, lo que representa un costo operativo a considerar en el dimensionamiento financiero.

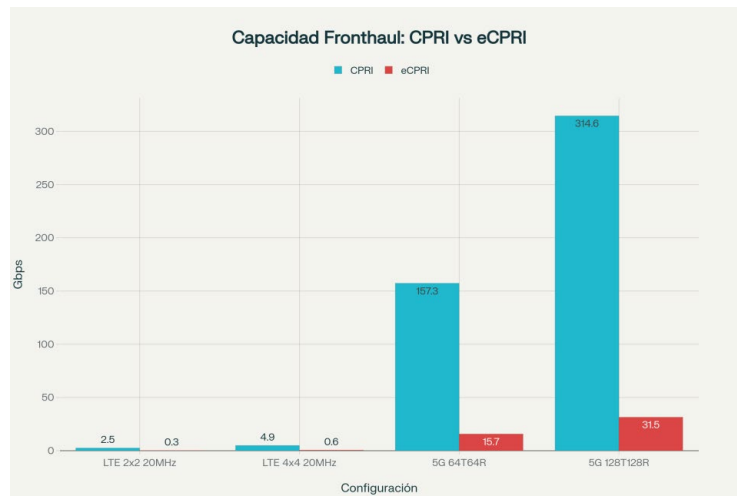


Figura 6. Comparativa de requisitos de capacidad fronthaul: CPRI tradicional vs eCPRI con split funcional 7,2

4.10. Dimensionamiento de capacidad por banda de frecuencia

El cálculo del dimensionamiento de capacidad en la Tabla 11 siguió la metodología de planificación 5G basada en link budget y modelos de propagación 3GPP [11].

Tabla 11. Dimensionamiento de capacidad para despliegue 5G en Portoviejo.

Parámetro	Banda n78 (3,5 GHz)	Banda n257 (28 GHz)	Unidad
Ancho de banda disponible	100 MHz	400 MHz	MHz
Eficiencia espectral DL	7,8	7,2	bps/Hz
Throughput teórico DL/celda	2,38	8,62	Gbps
Throughput teórico UL/celda	0.87	4,03	Gbps
Radio de cobertura estimado	~600	~150	m
Área de cobertura por sitio	1,13	0,07	km ²
Factor de densificación	1×	16×	-

Fuente: Cálculos basados en metodología de Farré Guijarro (2024) [18].

Los resultados evidencian que la banda n257 (28 GHz) requiere una densificación 16 veces mayor que la banda n78 (3,5 GHz) para cubrir la misma área geográfica. Esta diferencia justifica la estrategia de despliegue en fases, priorizando la cobertura inicial con 3,5 GHz y reservando mmWave para hotspots de alta demanda.

4.11. Algoritmo de selección de nodos ancla

Para la identificación sistemática de los eNodeB candidatos a servir como anclas en la arquitectura NSA Option 3x, en la Figura 7 se muestra el algoritmo de selección multicriterio:

```

# ALGORITMO 1: Selección de Nodos Ancla para Arquitectura NSA Option 3x

Entrada: Catastro_eNodeB[], Restricciones_Municipales[], Demanda_Tráfico[]
Salida: Nodos_Candidatos[]

INICIO
1. PARA cada eNodeB en Catastro_eNodeB:
  1.1 Verificar tecnología = LTE (4G)
  1.2 Verificar bandas ∈ {1900 MHz, AWS}
  1.3 Calcular puntuación_cobertura = población_cubierta / área_celda

2. PARA cada eNodeB candidato:
  2.1 Verificar ubicación ∉ Restricciones_Municipales.zonas_prohibidas
  2.2 Calcular distancia_fronthaul = distancia(eNodeB, nodo_fibra)
  2.3 SI distancia_fronthaul > 10 km ENTONCES descartar

3. PARA cada eNodeB válido:
  3.1 Calcular factor_demanda = tráfico_actual / capacidad_disponible
  3.2 Evaluar factor_infraestructura = {espacio, alimentación}

4. Calcular puntuación_final =
  0.25 x puntuación_cobertura +
  0.20 x densidad_poblacional +
  0.20 x proximidad_fibra +
  0.15 x factibilidad_regulatoria +
  0.10 x capacidad_infraestructura +
  0.10 x alimentación_eléctrica

5. Ordenar por puntuación_final DESC
6. RETORNAR top_N(Nodos_Candidatos)
FIN

```

Figura 7. Algoritmo 1-Selección de nodos ancla para arquitectura NSA Option 3x.

Este algoritmo pondera factores técnicos, regulatorios y de infraestructura para optimizar la selección de sitios, considerando específicamente las restricciones de las ordenanzas municipales de Portoviejo identificadas en la fase I de la auditoría.

4.12. Proceso de despliegue completo hacia 5G RAN

El diagrama de flujo integral del proceso de despliegue de la Figura 8 abarca desde la preparación inicial hasta la migración completa a arquitectura Standalone, las funcionalidades de la arquitectura se mencionan en la Tabla 12.

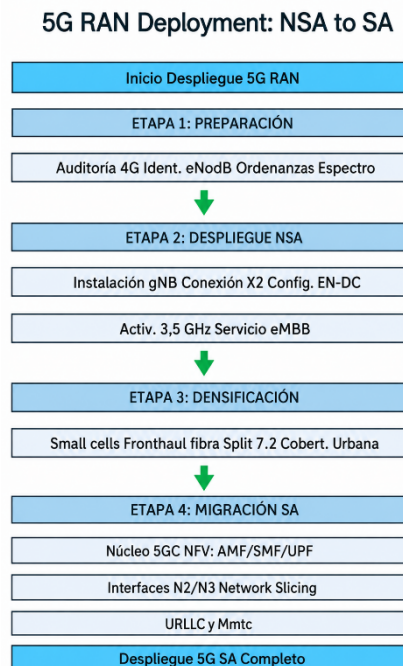


Figura 8. Diagrama de flujo del proceso de despliegue completo 5G RAN: desde arquitectura NSA hasta SA.

Tabla 9. Funcionalidades habilitadas por arquitectura.

Funcionalidad	NSA (Option 3x)	SA (Option 2)	Impacto para Portoviejo
Network Slicing	Limitado	Completo	Servicios diferenciados por vertical
Edge Computing (MEC)	Parcial	Nativo	Smart City municipal
URLLC (<1 ms)	No disponible	Disponible	Telemedicina, automatización
mMTC (10 ⁶ disp/km ²)	Limitado	Completo	IoT masivo agroindustria
Voice over NR	No (usa VoLTE)	Nativo	Calidad de voz mejorada
Handover intra-5G	Via 4G	Directo	Menor latencia en movilidad

Fuente: Especificaciones 3GPP Release 15/16, análisis Telefónica [11].

4.13. Detalle de fase de densificación

La densificación mediante small cells es el componente crítico para alcanzar los objetivos de capacidad 5G en áreas urbanas densas. Las características técnicas de este despliegue son:

Especificaciones de small cells 5G:

- Potencia de transmisión: 1-5 W (vs. 40-60 W macro celdas)
- Radio de cobertura: 50-200 m
- Separación típica: 100-200 m en zonas de alta demanda
- Ubicación: Mobiliario urbano, postes de alumbrado, fachadas de edificios
- Interfaz fronthaul: eCPRI sobre fibra óptica os enlaces mmWave

Consideraciones municipales para small cells en Portoviejo:

La ordenanza municipal establece que las estructuras deben integrarse al entorno mediante mimetización obligatoria, lo que incrementa el costo de despliegue, pero facilita la aceptación social. La Tabla 13 muestra los planes para 5G que estiman hasta 60 small cells por cada 2,5 km² en zonas urbanas densas.

Tabla 103. Requisitos de fronthaul para small cells.

Tipo de Small Cell	Capacidad Fronthaul	Latencia Máxima	Medio Recomendado
Femtocelda indoor	1-2,5 Gbps	250 μ s	Fibra/Ethernet
Picocelda outdoor	2,5-10 Gbps	150 μ s	Fibra GPON
Microcelda urbana	10-25 Gbps	100 μ s	Fibra dedicada

Fuente: small cell forum, análisis de fronthaul 5G [7].

4.14. Migración hacia arquitectura standalone (SA)

La transición de NSA a SA representa el paso final hacia la habilitación completa de las capacidades 5G. Esta migración se ejecutará cuando se cumplan los siguientes triggers:

Triggers de migración NSA→SA:

- Saturación de tráfico >80 % en celdas ancla 4G.
- Demanda confirmada de servicios URLLC (telemedicina, automatización).
- Disponibilidad de espectro adicional post-proceso competitivo ARCOTEL.
- Madurez de ecosistema de dispositivos 5G SA en el mercado ecuatoriano.

Componentes del núcleo 5GC:

La arquitectura SA requiere la implementación de un núcleo de red 5G nativo detallado en la Tabla 14 basado en principios cloud-native, NFV y SDN:

Tabla 14. Componentes del núcleo 5G RAN.

Función de Red	Descripción	Rol en 5GC
AMF	Access and Mobility Management Function	Gestión de movilidad y acceso
SMF	Session Management Function	Control de sesiones de datos
UPF	User Plane Function	Procesamiento del plano de usuario
AUSF	Authentication Server Function	Autenticación de usuarios
UDM	Unified Data Management	Gestión de datos de suscriptor
NSSF	Network Slice Selection Function	Selección de Network Slices

Fuente: Arquitectura de referencia 3GPP, Telefónica [11].

4.15. Indicadores de éxito del despliegue

Tabla 15. KPIs objetivo para cada fase de implementación.

KPI	Fase 1 (NSA)	Fase2 (Densificación)	Fase 3 (SA)	Meta IMT- 2020
Throughput DL usuario	100-500 Mbps	500 Mbps-1 Gbps	>1 Gbps	100 Mbps
Throughput UL usuario	50-100 Mbps	100-500 Mbps	>500 Mbps	50 Mbps
Latencia E2E	15-20 ms	10-15 ms	<10 ms	4 ms (eMBB)
Latencia URLLC	N/A	N/A	<1 ms	1 ms
Cobertura poblacional 5G	30 %	60 %	>90 %	-
Densidad de conexión	10 ⁴ /km ²	10 ⁵ /km ²	10 ⁶ /km ²	10 ⁶ /km ²

Fuente: Arquitectura de referencia 3GPP, Telefónica [11].

La consecución de estos indicadores detallados en la Tabla 15 permitirá validar el cumplimiento de los requisitos IMT-2020 establecidos por la UIT-R para redes de quinta generación.

5. DISCUSIÓN

Portoviejo exhibe una ausencia total de infraestructura 5G NR contrastada con 448 estaciones 4G LTE operativas en Manabí. Más significativa aún es la persistencia de 854 radiobases 3G, que supera a las 4G, revelando una transición tecnológica incompleta que caracteriza a países latinoamericanos en etapa pre-5G.

Esta situación responde a dos causas estructurales: primero, Ecuador aún no ha asignado espectro comercial 5G (a diferencia de Brasil, que implementó 5G SA operativo desde julio 2022, y Colombia, que desplegó NSA desde 2016); segundo, la brecha del Plan de Servicio Universal 2022-2025 (31,26 puntos porcentuales: 60,74 % cobertura 4G+ actual hacia 92 % meta 2025) exige acelerar despliegues, limitados por restricciones municipales.

El diagnóstico revela que la limitación principal no radica en la infraestructura los 448 eNodeB 4G ya existen y son perfectamente reutilizables como anclas NSA para 5G, sino en barreras regulatorias a dos niveles: el nacional, relacionado con la asignación de espectro, y el municipal, derivado de ordenanzas restrictivas locales.

Las ordenanzas municipales de Portoviejo establecen un marco restrictivo que diverge significativamente de marcos comparables latinoamericanos. Portoviejo impone: permiso anual renovable, 7 categorías de zonas prohibidas, tasas de 10-20% SBU diario, y mimetización obligatoria de estructuras. Este esquema es notable porque no diferencia entre macro celdas (40-60W) y small cells (1-5W), aplicando requisitos uniformes que penalizan la densificación requerida por 5G RAN.

En contraste: Brasil, mediante Ley 13,116/2015, implementa silencio administrativo positivo a 60 días, eliminando poder discrecional municipal para rechazar solicitudes de antenas. Colombia, mediante Resolución ANE 387/2016, emite regulación diferenciada que exime picoceldas y microceldas de ciertos requisitos de licenciamiento, reconociendo explícitamente la incompatibilidad entre marcos 4G y necesidades de densificación 5G. Portoviejo permanece con ordenanzas sancionadas en 2015, sin adaptación para realidades post-4G.

Esta rigidez municipal es cuantificable: ciclos de despliegue en Portoviejo (6-12 meses por sitio) se estiman 2-4 veces superiores a jurisdicciones con procedimientos simplificados (Brasil: 3-6 meses). Conforme a 5G Americas (2024), procesos administrativos diseñados para tecnologías anteriores "generan fricción regulatoria equivalente a barreras espectrales".

6. CONCLUSIONES

La investigación concluye que el despliegue de 5G RAN en Portoviejo es técnicamente viable mediante la infraestructura 4G existente y la arquitectura NSA Option 3x, con rutas de implementación factibles al integrar modelado técnico (estándares 3GPP y catastro ARCOTEL) [11] y análisis regulatorio (ordenanzas municipales, espectro y Plan de Servicio Universal).

Sin embargo, enfrenta barreras regulatorias clave: ordenanzas municipales restrictivas y costosas (tasas altas, permisos anuales y falta de agilidad para small cells), normativa local obsoleta (2015) que retrasa la implementación 2-4 veces, y la ausencia de asignación nacional de espectro 5G. Sin intervención estatal para liberar frecuencias, ninguna reforma municipal bastará para activar la red operativa.

La ruta de implementación es ejecutable en tres fases secuenciales con triggers de migración explícitos, ofreciendo un framework concreto que responde afirmativamente a la pregunta de

investigación. No obstante, su viabilidad comercial depende de resolver tres factores exógenos simultáneamente:

- Asignación de espectro banda C por ARCOTEL antes del segundo trimestre de 2025.
- Reforma municipal de ordenanzas para modelos diferenciados que habiliten small cells, picoceldas y microceldas con silencio administrativo positivo a 30-60 días (inspirado en Ley brasileña 13.116/2015 o Resolución colombiana ANE 387/2016).
- Coordinación nacional para dismantelar infraestructura 3G y liberar recursos en sitios compartidos.

La principal limitación no es técnica (los 448 eNodeB existentes son reutilizables, las especificaciones arquitectónicas están maduras y la banda C es la portadora primaria identificada internacionalmente), sino regulatoria: nacional (espectro) y municipal (procedimientos administrativos). En ciudades intermedias latinoamericanas, el despliegue de 5G RAN es un desafío de gobernanza integrada, no de ingeniería.

Esta investigación aporta tres elementos clave: demuestra la interdependencia entre políticas nacionales, locales y técnicas; propone una metodología replicable para otros municipios; y cuantifica la fricción burocrática, que incrementa los tiempos de implementación en 100%-300%, equiparándola a la escasez de espectro como barrera principal.

Los hallazgos demandan acciones inmediatas: para 2025, el GAD de Portoviejo debe regular small cells diferenciadamente, y MINTEL/ARCOTEL asignar espectro en banda C antes de junio, para viabilizar la fase 1 NSA (2025-2027) con 8-10 sitios macro en 18-24 meses, junto al dismantelamiento de 3G y migración a Standalone hacia 2030, habilitando IoT y Smart City.

Aunque limitada por datos provinciales no desagregados, ausencia de validación in situ y estimaciones financieras referenciales (lo que afecta precisión cuantitativa pero no la viabilidad técnica ni las barreras identificadas), sugiere futuras investigaciones en modelado de propagación local, análisis costo-beneficio y demanda sectorial.

En conclusión, la viabilidad del 5G en Portoviejo radica en una gobernanza integrada, no en capacidades técnicas; sin articulación de política espectral, regulación municipal e inversión coordinada, la ciudad quedará rezagada en fase pre-5G, confirmando que el despliegue es un reto normativo, temporal y fiscal.

REFERENCIAS

- [1] M. Z. Chowdhury, Md. Shahjalal, S. Ahmed, y Y. M. Jang, "6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions", *IEEE Open Journal. Communications of the Society*, vol. 1, pp. 957-975, jul 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2020.3010270>
- [2] Q. V. Khanh, N. V. Hoai, L. D. Manh, A. N. Le, y G. Jeon, "Wireless Communication Technologies for IoT in 5G: Vision, Applications, and Challenges", *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2022, no. 1, pp. 1-12, ene. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2022/3229294>.
- [3] A. Mughees, M. Tahir, M. A. Sheikh, y A. Ahad, "Towards Energy Efficient 5G Networks Using Machine Learning: Taxonomy, Research Challenges, and Future Research Directions", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 187498-187522, oct. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3029903>.
- [4] P. Rost et al., "Network Slicing to Enable Scalability and Flexibility in 5G Mobile Networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 5, pp. 72-79, may 2017. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600920>.

- [5] Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL). "Plan Nacional de Frecuencias", Resolución ARCOTEL no. 4, Quito, Ecuador, feb. 2022, [En línea]. Disponible en: <https://www.arcotel.gob.ec/plan-nacional-de-frecuencias/>.
- [6] R. Liu et al., "Integrated sensing and communication based outdoor multi-target detection, tracking, and localization in practical 5G Networks", *Intell. Conver. Netw.*, vol. 4, no. 3, pp. 261-272, sep. 2023, Disponible en: <https://doi.org/10.23919/icn.2023.0021>.
- [7] Asamblea Nacional del Ecuador "Ley para la Transformación Digital y Audiovisual irá a Registro Oficial", nov. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.asambleanacional.gob.ec/es/noticia/87090-ley-para-la-transformacion-digital-y-audiovisual-ira>
- [8] DPL News, "Ecuador establece 7 ejes para su transformación digital hacia 2030". Accedido: nov. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dplnews.com/ecuador-establece-7-ejes-transformacion-digital-2030/>
- [9] Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información, "Agenda-transformacion-digital-2022-2025", Acuerdo Nro. MINTEL-MINTEL-2022-022-ANEXO, Quito, Ecuador, aug. 2022. Disponible en: <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/2022/08/Acuerdo-Nro.-MINTEL-MINTEL-2022-022-ANEXO.pdf>
- [10] Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información (MINTEL), "Plan Nacional de Telecomunicaciones y Tecnologías de Información del Ecuador", p. 66, aug. 2021. Disponible en: <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/2016/08/Plan-de-Telecomunicaciones-y-TI..pdf>
- [11] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), "Study on migration and interworking for 5G", vol. Technical Report 3GPP TR 21.915 V15.0.0, Oct. 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/121900_121999/121915/15.00.00_60/tr_121915v150000p.pdf
- [12] International Telecommunication Union (ITU), "IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond", sep. 2015. [En línea]. Disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-S.pdf
- [13] GSMA, "5G Implementation Guidelines: NSA Option 3", Networks, 2018. Acceso: Nov. 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.gsma.com/solutions-and-impact/technologies/networks/gsma_resources/5g-implementation-guidelines-nsa-option-3/
- [14] N. Trabelsi, L. C. Fourati, y C. S. Chen, "Interference Management in 5G and Beyond Networks" *arXiv:2401.01608*, ene. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.01608>.
- [15] K. C. Apostolakis et al., "A network application approach towards 5G and beyond critical communications use cases", *Front. Commun. Netw.*, vol. 5, feb. 2024, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/frcmn.2024.1286660>.
- [16] M. J. Shehab, I. Kassem, A. A. Kutty, M. Kucukvar, N. Onat, y T. Khattab, "5G Networks Towards Smart and Sustainable Cities: A Review of Recent Developments, Applications and Future Perspectives", *IEEE Access*, vol. 10, pp. 2987-3006, ene. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3139436>.
- [17] V. D. Clavijo Reyes, "Análisis del impacto de la implementación de la tecnología 5G en la ciudad de Guayaquil, Provincia del Guayas, Ecuador," Tesis de grado, Univ. Tecnológica

- Empresarial de Guayaquil (UTEG), Guayaquil, Ecuador, 2022. [En línea]. Disponible: <http://biblioteca.uteg.edu.ec/handle/123456789/1752>
- [18] V. R. Farre Guijarro, "Planificación y optimización de una red 5g en las bandas 3.5/28 ghz para un operador local en el área metropolitana del sector Iñaquito de la ciudad de Quito", Tesis de Maestría, Escuela Politécnica Nacional, jun. 2024. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/25716>
- [19] Secretaría Nacional de Planificación, "Plan de Desarrollo para el Nuevo Ecuador 2024-2025 – Secretaría Nacional de la Administración Pública y Planificación", 2024. Accedido: Nov. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.planificacion.gob.ec/plan-de-desarrollo-para-el-nuevo-ecuador-2024-2025/>
- [20] E. Pupiales, "Estudio y análisis de los aspectos administrativos y económicos de la agenda de transformación digital del ecuador propuesta por el ministerio de telecomunicaciones y de la sociedad de la información - MINTEL", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, abr. 2024. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/25433>
- [21] S. P. Herrera, D. Villamarín, y D. Altamirano, "Desafíos para la implementación de redes móviles 5G en Ciudades Patrimoniales caso particular de Quito", *RISTI – Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, no. E68, pp. 594 - 606, abr. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9981842>
- [22] J. Peñafiel, "Estudio de la tecnología 5G y su relación con la calidad del servicio de la red celular en el sector san lorenzo de la ciudad de Lomas de Sargentillo" Tesis de Grado, Universidad Estatal del Sur de Manabí, mar. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/7862/1/PE%c3%91AFIEL%20PE%c3%91AFIEL%20JONNATHAN%20ALONSO.pdf>
- [23] S. Wijethilaka y M. Liyanage, "Estudio sobre la segmentación de redes para la implementación del Internet de las Cosas en redes 5G", *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 23, no. 2, pp. 957-994, mar. 2021, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3067807>
- [24] A. Banerjee et al., "5G enabled smart cities: A real-world evaluation and analysis of 5G using a pilot smart city application", *Internet Things*, vol. 28, dic. 2024, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101326>
- [25] ARCOTEL, "Oficio Nro. ARCOTEL-CCON-2025-0875-OF," Quito, D.M., jul. 2025. Disponible en: https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2025/09/18.1._arcotel-czo4-2025-0018_novisolutions_cia._ltda_-signed.pdf
- [26] Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información, "Plan Nacional de Soterramiento y Ordenamiento 2024", Quito, Ecuador, 2024, pp. 49. Disponible en: https://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/2024/09/Plan_Nacional_de_Soterramiento_y_Ordenamiento_2024.pdf
- [27] Consejo Municipal del GAD Portoviejo, "Ordenanzas Municipales. Cantón Portoviejo-Sustitutiva al Código Municipal, Libro 2 Componente Territorial, Título IX Capítulo III," Registro Oficial, Edición Especial no. 879, may 18, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://vlex.ec/vid/ordenanzas-municipales-canton-portoviejo-1037186237>
- [28] CNAF Ecuador, Resoluciones ARCOTEL 2021-2025. Quito, Ecuador: Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL), 2021-2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.arcotel.gob.ec/resoluciones-directorio2/>



Factores de contenido asociados al éxito crítico de videojuegos en la plataforma Steam: un análisis interpretativo mediante Canonical Biplot

(Content Factors Associated With the Critical Success of Video Games on Steam: An Interpretative Analysis Using Canonical Biplot)

Ariosto Vicuña Pino, Edwin Pacha-Herrera
Universidad Nacional de Loja

ariosto.vicuna@unl.edu.ec, edwin.paccha@unl.edu.ec

Resumen: La plataforma Steam concentra gran parte de la actividad del mercado de videojuegos para PC, siendo un entorno clave para estudiar factores asociados al desempeño de un juego. Investigaciones recientes relacionan reseñas, actividad de jugadores, precio e idiomas con la popularidad, aunque predominan enfoques predictivos con limitada capacidad interpretativa. El objetivo propuesto es determinar qué factores de contenido se asocian al éxito crítico en la plataforma Steam medido por Metacritic. Se realizó un estudio observacional, correlacional, cuantitativo y transversal, con una muestra no probabilística por cuotas anuales y filtrado por disponibilidad de valoración Metacritic los cuales fueron recolectados por web scraping y analizados bajo CRISP-DM mediante Canonical Biplot. Los resultados muestran que la interacción del jugador (reseñas, jugadores concurrentes, reseñas positivas) es el principal eje diferenciador. Además, en juegos actuales predominan variables de participación, mientras en juegos antiguos adquieren peso los logros, características adicionales y contenido descargable (DLC). El principal aporte es brindar una explicación visual e interpretativa de los factores asociados al éxito crítico de los videojuegos en la plataforma Steam, mostrando que las métricas de interacción del jugador tienen mayor peso que varias características estructurales del producto, y que esta relación cambia entre videojuegos antiguos y actuales.

Palabras clave: Éxito crítico, CRISP-DM, Metacritic.

Abstract: Steam platform accounts for a large share of activity in the PC video game market, making it a key environment for studying the factors associated with game performance. Recent research has linked reviews, player activity, price, and language availability to popularity, although predictive approaches with limited interpretive capacity still predominate. The objective of this study is to determine which content-related factors are associated with critical success on the Steam platform, as measured by Metacritic. This study employed an observational, correlational, quantitative, and cross-sectional design. A non-probability sample was constructed using annual quota sampling and then filtered based on the availability of Metacritic ratings. Data were obtained through web scraping and analyzed under the CRISP-DM methodology using the Canonical Biplot technique. The results show that player interaction variables reviews, concurrent players, and positive reviews constitute the main differentiating axis. In addition, participation-related variables predominate in recent games, whereas achievements, additional features, and Downloadable Content (DLC) carry greater weight in older games. The main contribution of this study is to provide a visual and interpretive explanation of the factors associated with the critical success of video games on the Steam platform, showing that player interaction metrics carry greater weight than several structural product characteristics, and that this relationship changes between older and more recent games.

Keywords: Critical success, CRISP-DM, Metacritic

1. INTRODUCCIÓN

La industria de los videojuegos se ha consolidado como un componente estratégico de la economía digital, tanto por su expansión sostenida como por la creciente complejidad de las interacciones que articula entre plataformas, usuarios y desarrolladores. En este contexto, Steam ocupa una posición relevante como ecosistema de distribución, consumo e interacción para videojuegos de PC, al integrar en un mismo entorno funciones comerciales, sociales e informacionales. Su importancia para la investigación académica radica en que concentra un volumen significativo de datos sobre comportamiento del jugador, recepción del producto y dinámicas de participación, lo que la convierte en un espacio empírico especialmente adecuado para examinar factores asociados al desempeño de un videojuego [1], [2]. A ello se suma que la plataforma emplea análisis de datos masivos para segmentar perfiles de usuarios y diseñar servicios personalizados orientados a reforzar la permanencia y el compromiso dentro del sistema [3]. En conjunto, estas características convierten a Steam en una infraestructura analítica privilegiada para el estudio del mercado de los videojuegos.

Sobre esta base, la literatura reciente ha abordado distintas dimensiones del desempeño de los videojuegos en Steam, principalmente desde perspectivas centradas en la popularidad, la interacción del usuario y la predicción del comportamiento de consumo. En esta línea, [5] aplicó modelos probabilísticos para anticipar la interacción de los jugadores a partir de datos conductuales, evidenciando la capacidad de la plataforma para identificar patrones y proyectar niveles de participación futura. De igual manera, [1] demostraron que variables como el precio, los idiomas soportados, la fecha de lanzamiento y los géneros contribuyen a predecir la popularidad de un videojuego en Steam, mientras que [2] identificaron que los géneros, los precios, las valoraciones y la reputación del publicador influyen en la preferencia de los jugadores y en la visibilidad de los títulos dentro del catálogo. A su vez, estudios centrados en reseñas y jugabilidad han mostrado que la información generada en la plataforma permite examinar tanto la experiencia del usuario como la calidad percibida del videojuego [3], [4]. En conjunto, estos antecedentes han consolidado una agenda de investigación en torno a los determinantes del éxito de los videojuegos en entornos de plataforma.

Sin embargo, el desarrollo de esta agenda ha estado marcado por un predominio de enfoques predictivos orientados a explicar popularidad, actividad del jugador o desempeño comercial, relegando a un segundo plano la comprensión del éxito crítico desde marcos interpretativos. Esta limitación es relevante, ya que la valoración crítica de un videojuego no puede reducirse únicamente a indicadores de mercado o de consumo, dado que también involucra atributos vinculados con la experiencia de juego, el diseño, la reputación y diversas señales de calidad percibida [6], [7]. En términos analíticos, ello obliga a distinguir entre los factores que favorecen la visibilidad o la adopción de un título y aquellos que se asocian con su legitimación crítica. Desde esta perspectiva, el Metascore constituye una medida especialmente pertinente para operacionalizar el éxito crítico, en tanto ofrece un indicador agregado, reconocido y comparable entre videojuegos. En efecto, [7] sostienen que el Metascore refleja de forma fiable la apreciación cualitativa de la crítica especializada, mientras que [8] y [9] respaldan su validez como medida empírica del éxito del videojuego y de la reputación de sus desarrolladores.

La literatura presenta un relativo descuido del éxito crítico como objeto de estudio, sino también en la naturaleza de las estrategias analíticas empleadas para abordarlo. De forma general, los trabajos existentes identifican variables con capacidad predictiva sobre determinados resultados, pero ofrecen una comprensión limitada de cómo dichas variables se articulan relacionamente dentro de una estructura multivariante. Así, [4] mostraron que las reseñas de jugadores permitieron evaluar dimensiones relevantes de la jugabilidad; [10] encontraron que las reseñas de pares se asocian con incrementos significativos en la actividad de juego; [11] evidenció que el éxito alcanzado en Steam puede proyectarse hacia otros entornos digitales, como Kickstarter; y [12] analizaron factores asociados a calificaciones altas, destacando la relevancia

de la jugabilidad y de la coherencia técnica. No obstante, estos aportes no abordan de manera central una representación conjunta, visual e interpretativa de la relación entre factores de contenido y éxito crítico. En consecuencia, persiste una brecha teórica y metodológica en torno a la comprensión estructural de los elementos que distinguen a los videojuegos con distinta valoración crítica.

A partir de este vacío, el presente estudio propone una aproximación orientada no solo a identificar asociaciones, sino también a representarlas e interpretarlas de manera integrada. Para ello, se recurre al Canonical Biplot, una técnica particularmente adecuada para este problema, dado que permite representar simultáneamente variables, observaciones y separación entre grupos en un espacio de baja dimensión, favoreciendo una lectura estructural del fenómeno analizado [13]. Su principal fortaleza frente a enfoques de baja interpretabilidad reside en su capacidad para hacer visibles patrones de proximidad, contraste y diferenciación entre categorías, posibilitando una comprensión más precisa de la organización relacional de las variables involucradas en el éxito crítico.

En concordancia con lo anterior, el objetivo general de este artículo es determinar los factores de contenido asociados al éxito crítico de los videojuegos en la plataforma Steam mediante la técnica Canonical Biplot. De este objetivo se derivan tres propósitos específicos: construir una base de datos integrada a partir de las plataformas Steam y Metacritic, analizar las relaciones entre variables de contenido y puntuación crítica, y comparar la estructura de asociación entre videojuegos antiguos y actuales. Asimismo, se plantea como expectativa analítica que las métricas de interacción del jugador y de recepción del mercado presentarán una asociación más intensa con el éxito crítico en videojuegos actuales, mientras que en títulos antiguos algunos atributos estructurales del producto podrían adquirir una relevancia relativa mayor.

La contribución del estudio se sitúa en dos planos complementarios. En el plano sustantivo, aporta evidencia sobre la configuración de los factores asociados al éxito crítico de los videojuegos en Steam. En el plano metodológico, introduce una lectura multivariante, visual e interpretativa que desplaza el análisis desde enfoques predominantemente predictivos hacia una comprensión más estructural de las relaciones entre variables de contenido, recepción del usuario y valoración crítica. Sobre esta base, el artículo se organiza en cinco secciones adicionales: estado del arte, metodología, resultados, discusión y conclusiones.

2. ESTADO DEL ARTE

La discusión dominante en la investigación reciente sobre videojuegos digitales ha estado marcada por tres grandes ejes: la predicción de popularidad o éxito, el análisis de reseñas y comportamiento del jugador, y la búsqueda de modelos explicativos que vinculen atributos del producto con desempeño en plataforma. Steam aparece de manera recurrente como entorno empírico privilegiado por la abundancia de metadatos, la trazabilidad de las reseñas y la posibilidad de observar dinámicas de participación a gran escala [1], [2].

Existen trabajos que modelan el éxito de un videojuego desde una perspectiva predictiva. [1] analizaron la popularidad temprana de juegos en la plataforma Steam y encontraron que variables como precio, idiomas, fecha de lanzamiento y géneros aportan información útil para estimar el número de jugadores. El valor de este estudio radica en mostrar que los metadatos del producto contienen señales tempranas de desempeño; sin embargo, su foco se concentra en popularidad y no en éxito crítico. En una línea parecida, [2] estudiaron el catálogo de la plataforma Steam y concluyeron que algunos factores que influyen en la popularidad del juego son los géneros, los precios, las valoraciones y la reputación del publicador. Este trabajo es útil porque amplía el conjunto de variables relevantes dentro del ecosistema Steam, aunque mantiene una lógica orientada a preferencia y recomendación, más que a interpretación crítica del producto.

También existen estudios que conectan el desempeño de la plataforma Steam con resultados externos. [11] mostró que el éxito de videojuegos en Steam incrementa en 24,1 % el monto recaudado en campañas de Kickstarter, evidenciando que las señales de éxito dentro de una plataforma pueden trasladarse a otros mercados digitales. Este hallazgo es importante porque sugiere que el rendimiento en la plataforma Steam opera como un mecanismo reputacional; sin embargo, sigue siendo una aproximación centrada en efectos causales y económicos más que en estructuras interpretativas de variables.

Por otra parte, existen estudios que priorizan el papel de las reseñas, la jugabilidad y la interacción del usuario. [4] propusieron un enfoque de análisis de jugabilidad basado en reseñas de jugadores, mostrando que la minería de opiniones permite identificar fortalezas y debilidades de un videojuego en términos de calidad percibida. Este estudio resulta especialmente relevante porque desplaza la evaluación desde atributos puramente técnicos hacia la experiencia reportada por los usuarios. En el mismo sentido, [10] encontraron que la creación de una reseña por parte de un amigo se asocia con una tasa significativamente mayor de juego posterior. Este hallazgo refuerza la idea de que las reseñas no solo reflejan experiencia, sino que también modifican comportamiento. A su vez, [7] mostraron que las reseñas de usuarios y críticos no producen efectos idénticos sobre el desempeño de un videojuego, lo que sugiere que ambas fuentes de evaluación aportan señales diferentes dentro del mercado.

Además, [6] argumentan que el éxito del videojuego depende de la interacción entre cualidades de búsqueda y de experiencia. Su trabajo aporta un matiz importante: la recepción positiva de un juego no proviene de un solo atributo, sino de una combinación de señales previas al consumo y experiencias efectivas durante el uso. En un plano cercano, [14] subrayan que la lógica de publicación en la plataforma Steam también se relaciona con componentes de metajuego, interacción prolongada y compromiso del usuario.

En conjunto, el estado del arte permite afirmar que existe cierto consenso en torno a que el desempeño de un videojuego depende de una combinación de factores estructurales, señales de recepción del público y mecanismos de reputación. Sin embargo, persiste un problema no resuelto: la mayoría de los estudios analizan estas variables desde modelos predictivos, análisis parciales de reseñas o aproximaciones centradas en ventas y popularidad. Lo que aún no ha sido suficientemente abordado es una lectura interpretativa, simultánea y visual de la relación entre factores de contenido y éxito crítico.

Esta brecha es relevante porque el éxito crítico no equivale exactamente a la popularidad ni al desempeño comercial. Además, la literatura revisada no muestra una aplicación consolidada del Canonical Biplot para estudiar, en un mismo espacio analítico, atributos de contenido, variables de participación del jugador y categorías de valoración crítica. Dado que el CVA biplot permite representar grupos, medias, variables y casos en un mismo plano, constituye una alternativa pertinente para responder ese vacío [13].

3. METODOLOGÍA

Se usó la metodología CRISP-DM (Cross-Industry Standard Process for Data Mining) que es considerada robusta, flexible y adaptable para proyectos contemporáneos de ciencia de datos por su capacidad para organizar el ciclo completo del proyecto y, al mismo tiempo, permitir ajustes según el dominio de aplicación, los requisitos del negocio y la complejidad técnica del problema [15], [16]. CRISP-DM se describe mediante seis fases principales: comprensión del negocio, comprensión de los datos, preparación de los datos, modelado, evaluación y despliegue. Estas fases no se ejecutan necesariamente de forma lineal, sino que conforman un proceso cíclico con retroalimentación entre etapas, especialmente entre preparación, modelado y evaluación [17]. CRISP-DM mantiene una orientación fuerte hacia el valor práctico del análisis, ya que los

modelos deben responder a necesidades reales del contexto y no limitarse a alcanzar métricas técnicas aceptables [16].

En la fase de comprensión del negocio se concretó que, en el contexto de los videojuegos de la plataforma Steam, el éxito crítico puede llevar a la determinación de las características de éxito de los videojuegos desde un punto de vista no comercial. Tomando en cuenta que el éxito crítico se refiere al reconocimiento y la valoración positiva que un videojuego recibe por parte de la crítica especializada. Las variables que se consideraron se organizaron en cuatro bloques: factores de contenido, factores de éxito, factores de evaluación del jugador y factores del producto. La Tabla 1 presenta las categorías y variables a ser extraídos desde la plataforma Steam (<https://store.steampowered.com>).

Tabla 1. Lista de las variables contenidas en la plataforma Steam.

Categoría	Variables	Interpretación
Factores de contenido	achievements_count	Logros: Representan profundidad, progreso y rejugabilidad del juego.
	features_count	Características: Determinan complejidad estructural y diversidad de la experiencia de juego.
	dlc_count	Contenido descargable: Reflejan soporte continuo y extensión del ciclo de vida del producto.
	languages_count	Idiomas soportados: Mide accesibilidad internacional y alcance global del juego.
Factores de éxito	metacritic_score	Puntuación crítica: Indicador global de calidad crítica del videojuego.
	reviews_count	Popularidad en la plataforma Steam: Refleja aceptación del mercado y difusión del producto.
	peak_players	Máximo de jugadores conectados: Mide intensidad de uso y adopción del videojuego en la plataforma.
Factores de evaluación del Jugador	positive_reviews_percent	Evaluación positiva: Representa satisfacción global de los usuarios.
Factores del producto	price	Precio: Determina barrera económica de acceso al producto.
	genres_count	Géneros: Indica diversidad temática del juego.
	early_access	Acceso anticipado: Indica lanzamiento en fase temprana de desarrollo.
	is_free	Juego gratuito: Define modelo de monetización del producto.

La población de referencia estuvo conformada por videojuegos publicados en la plataforma Steam en la sección “Lo mejor del año”. La muestra se construyó usando una selección no probabilística por cuotas anuales cien registros por año dentro del periodo 2022 - 2025 y aplicando un filtrado por disponibilidad de valoración Metacritic. Como resultado del proceso de depuración, la muestra final quedó conformada por 116 videojuegos. Para la extracción, se realizó un proceso de web scraping, que es una técnica para extraer información de páginas web de forma

automática usando scripts mediante cuatro pasos básicos: acceder a una página, leer su contenido HTML, identificar los datos deseados variables y guardarlos en un formato útil. El lenguaje de programación Python proporcionó las facilidades necesarias para su implementación. El proceso para obtener los valores de las variables descritas en la Tabla 1, tiene varias etapas porque no todos los valores de las variables se encuentran en la misma página. El proceso se ejecutó obteniendo como producto un dataset por año. A continuación, la Tabla 2 describe el desarrollo del web scraping.

Tabla 2. Procedimiento para obtener los valores de las variables desde el sitio de Steam.

Web Scraping	Descripción
Se extrajo la lista de juegos desde la plataforma Steam Best of 202x x= [2, 3, 4, 5]	Se intentó obtener hasta 100 juegos (si la página los expone) desde https://store.steampowered.com/charts/bestofyear/202x Se extrajeron las siguientes columnas: steam_id, nombre, url, image_url desde múltiples fuentes dentro de cada página. Se guardó en un archivo de Excel.
Se obtuvo las puntuaciones de Metacritic de los juegos de la plataforma Steam	Se construyó la URL automáticamente mediante: " https://store.steampowered.com/app/{steam_id}/ " Se extrajeron las siguientes columnas relevantes: release_year, price, genres_count, achievements_count, is_free, languages_count, metacritic_score, early_access, review_score, url Se guardó en un archivo de Excel.
Se adquirió las columnas reviews_count y positive_reviews_percent	Se usó Steam App Reviews API oficial aplicado a la dirección: " https://store.steampowered.com/appreviews/{steam_id}/ " No se utilizó SteamDB ni SteamCharts. Se guardó en un archivo de Excel.
Se consiguió las columnas dlc_count, features_count y peak_players	Se construyó la URL automáticamente mediante: " https://store.steampowered.com/app/{steam_id}/?l=english " Se guardó en un archivo de Excel.

Estudios recientes continúan mostrando que la preparación de datos contiene fases decisivas porque condicionan la confiabilidad del resultado analítico final [17], [18]. El proceso de web scraping dejó cuatrocientos registros, de los cuales se seleccionaron ciento dieciséis registros que cumplieron con tener una valoración de Metacritic (metacritic_score). También se eliminaron todas las columnas no numéricas (name, review_score, developer, publisher, url) o aquellas de ningún valor para el análisis (steam_id). De esta manera, se prepararon los datos para aplicar la técnica de Canonical Biplot.

Se determinó si las variables numéricas necesitan una transformación logarítmica, de acuerdo con su característica. Las variables que no se transformaron porque sus escalas son comparables se mencionan a continuación: positive_reviews_percent, price, genres_count, is_free, early_access, metacritic_score.

Las restantes variables numéricas se sometieron a una transformación logarítmica necesaria porque sus valores vienen de procesos de conteo o con distribuciones de cola larga, como ocurre con métricas de popularidad en plataformas digitales. La transformación logarítmica reduce la asimetría de la distribución, estabiliza la varianza y evita que valores extremos dominen el análisis

factorial. Las variables para transformar son: reviews_count, peak_players, dlc_count, achievements_count, features_count, languages_count.

La transformación utilizada se expresa en la Ecuación 1

$$x' = \log(x + 1) \quad (1)$$

donde:

- x representa el valor original de la variable
- x' corresponde al valor transformado.

El término +1 se incorporó para evitar problemas cuando la variable toma el valor cero. La Tabla 3 muestra todas las variables que serán parte del estudio. A las variables que se aplicó una transformación logarítmica se le agregó la notación _log1p.

Tabla 3. Variables que intervienen en el gráfico de Canonical Biplot.

Variable original	Variable final	Descripción
achievements_count	achievements_count_log1p	Número total de logros por juego
features_count	features_count_log1p	Cantidad de funcionalidades o modos disponibles
dlc_count	dlc_count_log1p	Número de expansiones o contenido adicional
languages_count	languages_count_log1p	Número total de idiomas disponibles
reviews_count	reviews_count_log1p	Volumen total de reseñas de jugadores
peak_players	peak_players_log1p	Máximo histórico de jugadores concurrentes
positive_reviews_percent	positive_reviews_percent	Porcentaje de reseñas positivas
price	price	Precio de venta del videojuego
genres_count	genres_count	Número de géneros asociados
early_access	early_access	Estado de desarrollo anticipado
is_free	is_free	Indica si el juego es gratuito

Finalmente, todas las variables fueron estandarizadas mediante Z-score antes del análisis con Canonical Biplot para evitar diferencias de escala entre variables.

En la fase de modelado del análisis de las características de los videojuegos de la plataforma Steam se requirió abordar simultáneamente múltiples dimensiones del producto, incluyendo características estructurales del juego, indicadores de popularidad en plataformas digitales y evaluaciones críticas. En este contexto, el Canonical Biplot constituye una herramienta estadística adecuada para analizar sistemas multivariantes donde los individuos (videojuegos) se describen mediante múltiples variables cuantitativas y, al mismo tiempo, pueden organizarse en grupos definidos por una variable categórica, como los niveles de puntuación crítica en Metacritic.

Desde una perspectiva metodológica, una ventaja central del Canonical Biplot es su capacidad para identificar qué variables contribuyen a la diferenciación entre grupos dentro de un conjunto de datos multivariantes. Canonical Biplot se basa en una descomposición de la matriz de datos

que maximiza la separación entre grupos previamente definidos, de forma similar a los enfoques basados en análisis discriminante multivariante. De acuerdo con [13], el Canonical Biplot permite examinar de forma conjunta la separación entre grupos, la orientación de las variables y la calidad de representación de los casos, lo que lo vuelve especialmente útil cuando el interés de investigación es explicativo antes que puramente predictivo.

Las evaluaciones de críticos influyen en el comportamiento de compra y en el desempeño comercial de los videojuegos, y que estas relaciones presentan estructuras no lineales y dependientes del contexto del mercado [7]. Estas variables forman un sistema complejo de relaciones que requiere métodos multivariantes para ser analizado de manera adecuada. El Canonical Biplot va a proporcionó un análisis simultáneo de las variables relacionadas con contenido del juego (achievements_count, dlc_count, features_count, languages_count), indicadores de popularidad en la plataforma (reviews_count, peak_players, positive_reviews_percent) y características del producto (price, genres_count, early_access, is_free). La representación conjunta de estas variables en el espacio factorial facilita la identificación de los factores que diferencian videojuegos con distintos niveles de puntuación crítica, permitiendo interpretar el sistema de variables de forma integrada. En este estudio se estimaron tres representaciones: un canonical biplot global, uno para videojuegos antiguos y otro para videojuegos actuales.

La investigación contemporánea resalta que esta evaluación debe ir más allá de la precisión predictiva e incorporar consideraciones sobre robustez, confiabilidad, transparencia y aplicabilidad en escenarios reales [17]. La fase de evaluación tuvo como propósito determinar si los modelos desarrollados permitieron responder al problema de investigación planteado: identificar las características estructurales y de popularidad asociadas con videojuegos con alta puntuación crítica. En este estudio, la evaluación se centró en verificar si el Canonical Biplot permitió: Identificar patrones multivariantes en las características de los videojuegos, diferenciar grupos de juegos según su puntuación en Metacritic y determinar qué variables contribuyen a explicar el éxito crítico de los juegos.

La evaluación de la varianza explicada en la Ecuación 2 analizó el porcentaje de varianza explicada por los primeros ejes factoriales:

$$\text{Varianza explicada} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\sum \lambda_i} \quad (2)$$

Donde:

λ son los valores propios asociados a los componentes canónicos. Un porcentaje alto indica que el plano factorial representa adecuadamente la estructura de los datos.

La evaluación de la separación entre grupos de videojuegos verificó si el modelo permitió distinguir entre videojuegos con diferentes niveles de puntuación crítica. Los grupos evaluados fueron: Metacritic alto, Metacritic medio y Metacritic bajo. La evaluación se realizó observando la separación espacial entre grupos en el Canonical Biplot (Tabla 4), la orientación de las variables respecto a los grupos y la concentración o dispersión de los videojuegos en el espacio factorial.

Tabla 4. Grupos de separación espacial en el Canonical Biplot.

Variables de popularidad	Variables estructurales del juego	Variables del producto
reviews_count	achievements_count	price
peak_players	dlc_count	genres_count
positive_reviews_percent	features_count	early_access
	languages_count	is_free

La evaluación de la contribución de las variables analizó la longitud y dirección de los vectores en el Biplot para identificar qué variables influyen en la separación de los videojuegos. Las variables con vectores más largos y alineadas con determinados grupos indican mayor influencia en la estructura multivariante.

En la evaluación comparativa entre videojuegos actuales y antiguos se evaluaron tres configuraciones del modelo: Videojuegos actuales, videojuegos antiguos y conjunto completo. Esto permitió analizar si las variables que caracterizan el éxito del juego se mantienen estables o cambian según el periodo analizado. La comparación se realizó mediante: La estructura del plano factorial, distribución de los grupos y la orientación de los vectores de variables.

La evaluación final del modelo implicó considerarlo adecuado cuando: El plano factorial explica una proporción significativa de la variabilidad de los datos, existe separación observable entre grupos de puntuación, las variables presentan interpretaciones coherentes con el comportamiento del mercado de videojuegos y los resultados son consistentes entre los diferentes conjuntos de datos analizados.

La fase de despliegue en este estudio se realizó mediante la generación y análisis de tres representaciones gráficas basadas en Canonical Biplot, que según [13] y [19] permitió visualizar relaciones multivariadas entre variables, combinando precisión analítica y capacidad explicativa. La técnica se basa en el Análisis de Correlación Canónica (ACC), cuyo objetivo es encontrar las combinaciones lineales de variables canónicas de cada conjunto que tienen la máxima correlación entre sí [20]. El modelo desarrollado se desplegó a través de tres gráficos de Canonical Biplot que representan diferentes configuraciones del conjunto de datos analizado. Los gráficos generados están en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados de la fase de despliegue.

Canonical Biplot	Objetivo	Permite analizar
Videojuegos actuales	Identificar las variables que caracterizan el éxito crítico en el mercado actual.	Relación entre popularidad y evaluación crítica.
		Distribución de los juegos según niveles de Metacritic.
		Variables dominantes en el contexto actual del mercado.
Videojuegos antiguos	Evaluar si las características asociadas al éxito crítico eran diferentes en periodos anteriores.	Cambios estructurales en las variables relevantes.
		Diferencias en la distribución de los juegos.
		Evolución de los factores asociados al éxito.
Conjunto completo de videojuegos	Identificar la estructura global de relaciones entre variables y puntuación crítica.	Visualizar la estructura multivariante general
		Identificar variables dominantes en el conjunto total de datos
		Comparar la posición relativa de videojuegos actuales y antiguos.

Como resultado del proyecto se generaron los siguientes artefactos analíticos:

1. Dataset limpio y estructurado para análisis multivariante.
2. Scripts reproducibles para la generación del modelo.
3. Tres representaciones gráficas basadas en Canonical Biplot.
4. Interpretación analítica de los patrones observados.

Además, se usó Python con Visual Studio Code para realizar el proceso de web scraping y R Statistics junto con el paquete MultBiplotR creado por [21] para realizar los gráficos de Canonical Biplot. Con estos elementos es factible reproducir el análisis y facilitar su aplicación en futuros estudios sobre videojuegos.

4. RESULTADOS

4.1 Estructura general de las variables asociadas al éxito crítico

El análisis global mostró que las variables `reviews_count`, `peak_players` y `positive_reviews_percent` se alinearon hacia una misma región del espacio factorial, lo que indicó una asociación positiva dentro de la estructura multivariante del modelo. Los videojuegos clasificados con puntuación crítica alta se concentraron en la dirección de estos vectores, mientras que los títulos con puntuación crítica baja aparecieron en regiones opuestas del plano. Ver Figura 1.

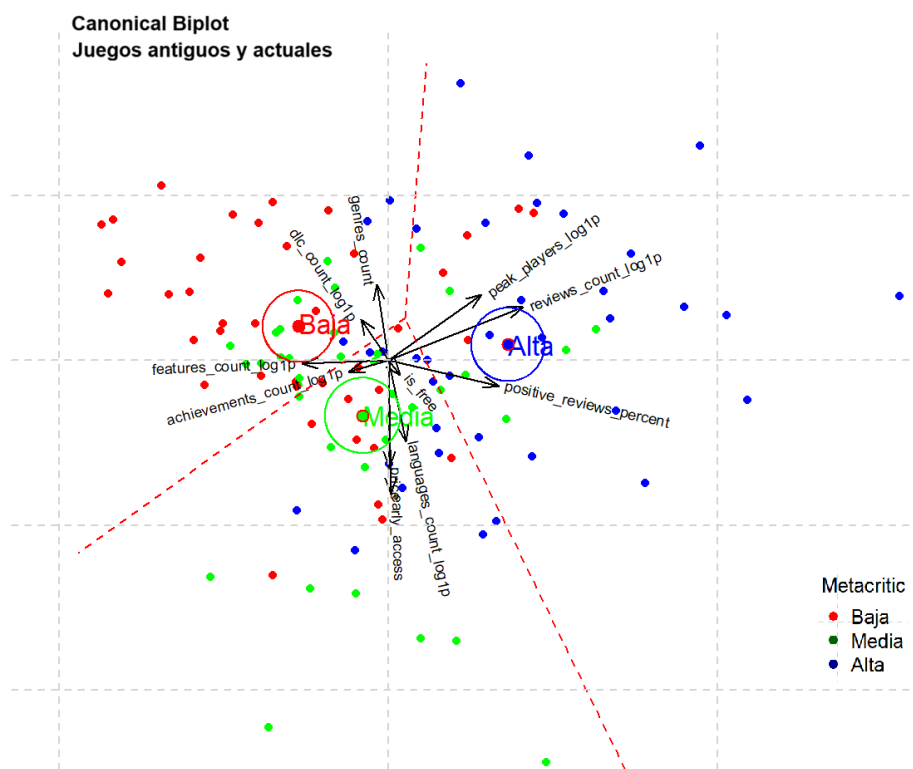


Figura 1. Canonical Biplot aplicado al conjunto de datos entre los años 2022-2025 (videojuegos actuales y antiguos).

En contraste, variables como `features_count`, `achievements_count` y `dlc_count` se proyectaron con mayor cercanía a zonas asociadas a puntuaciones críticas inferiores o intermedias, lo que sugiere una contribución distinta en la organización del espacio multivariante. La estructura discriminante del modelo se concentra principalmente en las dos primeras dimensiones canónicas. La inercia canónica obtenida para la dimensión uno fue 84,36 y 15,63 para la dimensión dos.

4.2 Videojuegos actuales

En el subconjunto de videojuegos actuales se observó una agrupación más clara de los títulos con puntuación crítica alta en torno a `reviews_count`, `peak_players` y `positive_reviews_percent`. Este patrón indicó que, en los juegos recientes, las variables ligadas a participación del usuario y recepción del mercado presentaron mayor peso discriminante en la diferenciación entre niveles de Metacritic (Figura 2).

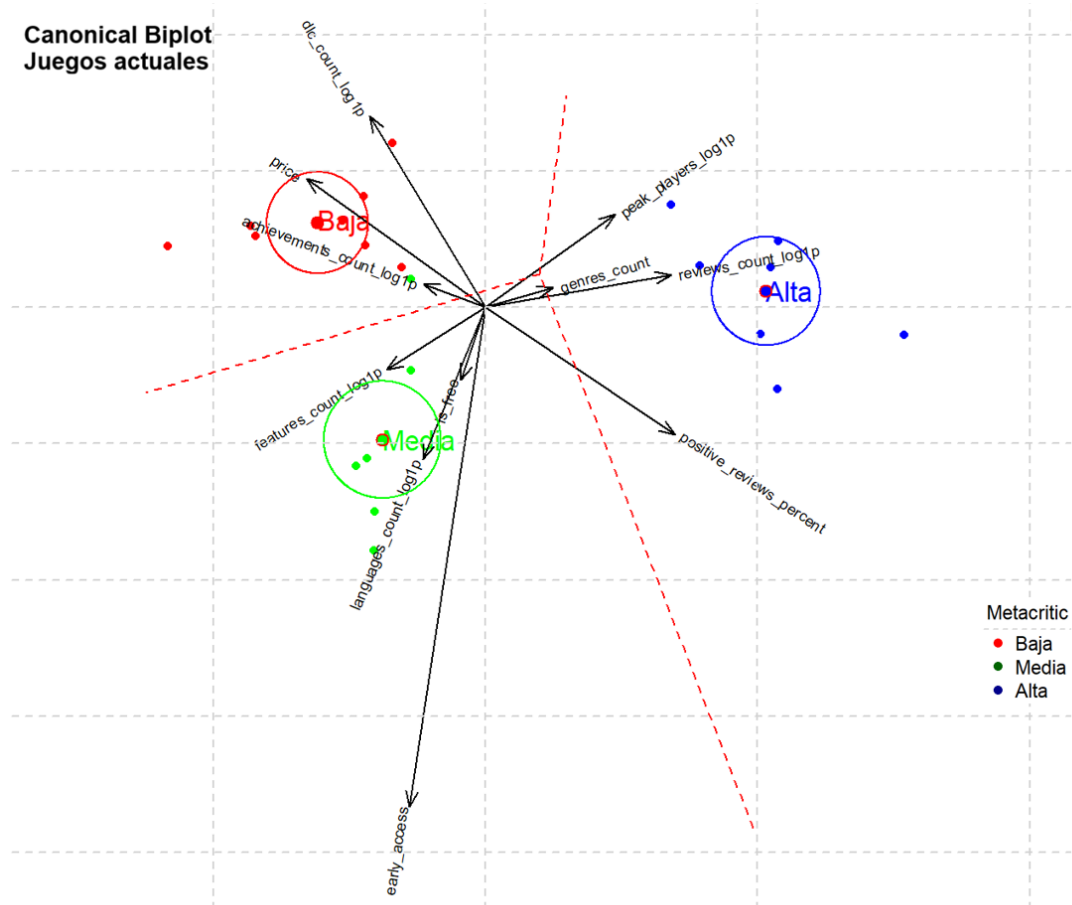


Figura 2. Canonical Biplot aplicado al conjunto de datos del año 2025(videojuegos actuales).

Por su parte, los juegos con puntuación crítica baja tendieron a orientarse hacia variables estructurales como `price` y `achievements_count`, mientras que la categoría media ocupó una posición intermedia cercana a `features_count` y `languages_count`. En este subconjunto, la separación entre grupos es más definida que en el caso de los videojuegos antiguos. En cuanto a la inercia canónica se tuvo 83,68 para la dimensión uno y 16,31 para la dimensión dos.

4.3 Videojuegos antiguos

En los videojuegos antiguos se mantuvo la asociación entre puntuación crítica alta y `positive_reviews_percent`, pero la orientación de `reviews_count` y `peak_players` apareció más dispersa. A diferencia de lo observado en los juegos recientes, en este subconjunto adquirieron mayor peso relativo variables de contenido y complejidad estructural, como `features_count`, `achievements_count` y `dlc_count`. Además, la distribución espacial de los grupos mostró una superposición mayor entre categorías de puntuación crítica, lo que indica una separación menos marcada entre niveles de éxito crítico en comparación con los videojuegos actuales (Figura 3).

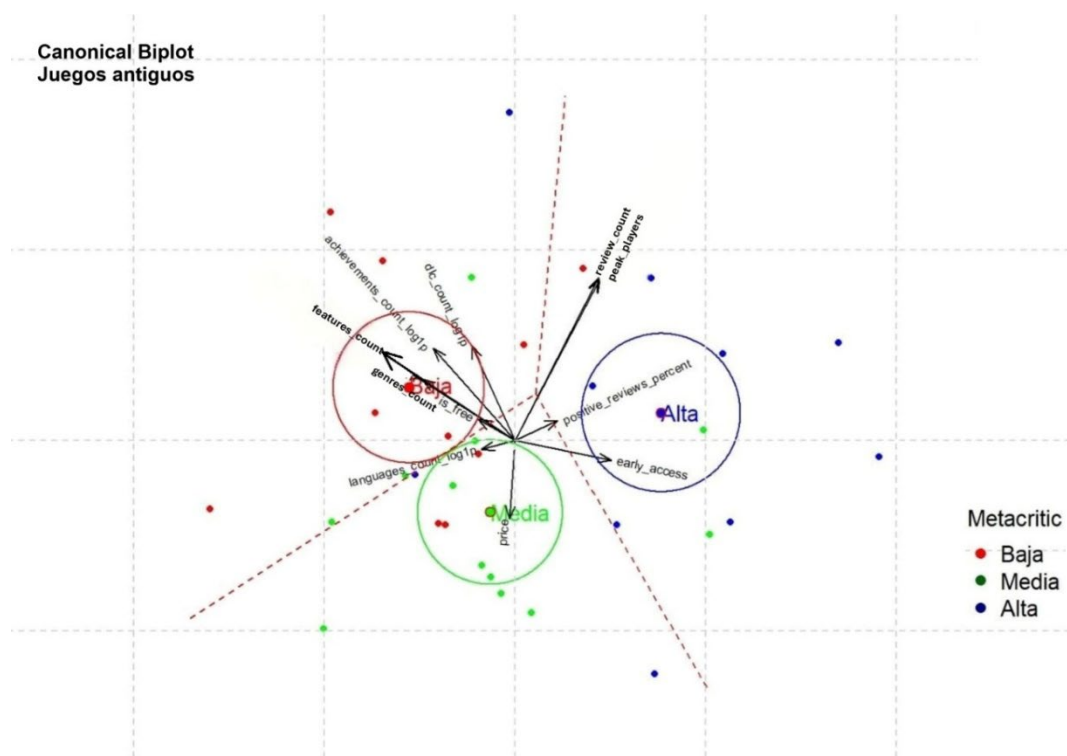


Figura 3. Canonical Biplot aplicado al conjunto de datos del año 2022 (videojuegos antiguos).

La comparación entre los tres biplots permite afirmar que la estructura del éxito crítico no es idéntica entre videojuegos actuales y antiguos. En los títulos recientes, la diferenciación entre puntuaciones se alinea principalmente con variables de participación y recepción del jugador. En los títulos antiguos, en cambio, se observó una mayor influencia relativa de características internas del producto. También se identificó que variables como `languages_count` y `genres_count` presentan vectores de menor magnitud, lo que indica una contribución discriminante más limitada dentro del espacio factorial. Se obtuvo una inercia canónica de 77,42 y 22,57 para las dimensiones uno y dos, respectivamente.

5. DISCUSIÓN

Los resultados de esta investigación sugieren que el éxito crítico de los videojuegos en la plataforma Steam se organiza, ante todo, alrededor de señales de participación del jugador y recepción del mercado. En particular, el número de reseñas, el máximo histórico de jugadores concurrentes y el porcentaje de reseñas positivas constituyen el núcleo estructural que diferencia a los videojuegos con mejor y peor puntuación crítica. Este hallazgo coincide con lo reportado por [4], quienes mostraron que las reseñas de jugadores permitieron capturar dimensiones significativas de calidad percibida, y con [10], quienes observaron que las reseñas también influyen en la actividad de juego.

Los hallazgos también dialogan con [7], quienes mostraron que las reseñas de usuarios y críticos no tienen un efecto idéntico sobre el desempeño del videojuego. En el presente estudio, la proximidad entre métricas derivadas de usuarios y categorías de alta valoración crítica sugiere que, aunque la crítica profesional y la evaluación del público no sean equivalentes, sí pueden converger dentro de una misma estructura de legitimación del producto. Esto ayuda a explicar por qué variables sociales y de compromiso aparecieron tan cerca del grupo de mejor evaluación crítica.

De forma adicional, los resultados se alinean con la literatura que subraya la relevancia de señales de mercado dentro del ecosistema de Steam. [1] y [2] ya habían mostrado que metadatos como precio, géneros e idiomas ayudan a explicar popularidad. Sin embargo, en este estudio dichas variables no aparecieron como el principal eje discriminante del éxito crítico. Esta diferencia es importante porque sugiere que no es lo mismo explicar popularidad que explicar valoración crítica. En otras palabras, algunas variables útiles para estimar visibilidad o número de jugadores pueden ser menos decisivas cuando el resultado de interés es la recepción crítica agregada.

Otro hallazgo relevante es la diferencia entre videojuegos actuales y antiguos. En los juegos recientes, las métricas de participación del jugador desempeñan un papel más fuerte en la organización del espacio factorial. En los juegos antiguos, por el contrario, adquieren mayor protagonismo variables estructurales del producto, como logros, características adicionales y DLC. Este contraste puede interpretarse como un cambio en la lógica de validación del videojuego dentro del ecosistema digital: mientras que en etapas previas el contenido estructural podía funcionar como señal central de valor, en el contexto actual parecen pesar más las métricas visibles de interacción, comunidad y aceptación del usuario.

Los resultados también encuentran apoyo parcial en [6], quienes argumentan que el éxito del videojuego no depende de un único atributo, sino de la interacción entre cualidades de búsqueda y experiencia. Esa lógica se observa aquí en forma de estructura multivariante: no es una sola variable la que explica la puntuación crítica, sino la articulación entre recepción positiva, actividad de juego y difusión social del producto. Asimismo, [14] habían señalado que la lógica de metajuego y la persistencia de participación pueden ser claves en plataformas como Steam; el presente estudio aporta evidencia visual de esa centralidad dentro del éxito crítico.

Desde el punto de vista metodológico, el trabajo verifica la pertinencia del Canonical Biplot como herramienta de análisis interpretativo. Tal como explican los autores [13], esta técnica permite representar al mismo tiempo grupos, variables y observaciones, lo que facilita la comprensión de sistemas complejos. En este caso, esa representación fue especialmente útil para traducir relaciones estadísticas en patrones visuales legibles para investigación y toma de decisiones.

No obstante, el estudio presenta limitaciones. En primer lugar, la muestra se restringe a videojuegos populares de la plataforma Steam con datos disponibles y puntuación crítica trazable, lo que excluye a videojuegos de menor visibilidad. Esta omisión podría condicionar la profundidad del análisis al determinar las características que diferencian a los videojuegos actuales de los antiguos. En segundo lugar, el diseño es transversal, de modo que no permite establecer causalidad. Finalmente, no se incorporaron variables cualitativas como complejidad narrativa, estética, estrategia de marketing o calidad técnica profunda, que podrían enriquecer la explicación del éxito crítico.

En términos aplicados, los resultados sugieren que desarrolladores y editores deberían prestar especial atención a mecanismos que fortalezcan la participación del jugador, el volumen de reseñas positivas y la sostenibilidad de la comunidad alrededor del producto. Al mismo tiempo, la comparación temporal muestra que el diseño del contenido sigue siendo relevante, aunque su peso relativo puede variar según el contexto histórico del mercado.

6. CONCLUSIONES

Este estudio permitió establecer que el éxito crítico de los videojuegos en la plataforma Steam, medido mediante la puntuación en Metacritic, se relaciona principalmente con variables de interacción del jugador y recepción del mercado. En particular, el volumen de reseñas, el pico histórico de jugadores concurrentes y el porcentaje de reseñas positivas constituyen el principal eje de diferenciación entre videojuegos con distintas categorías de valoración crítica.

Asimismo, el análisis comparativo mostró que esa estructura cambia según la temporalidad del videojuego. En los videojuegos actuales, la participación del usuario y la recepción visible dentro de la plataforma tienen una capacidad discriminante mayor. En los videojuegos antiguos, en cambio, algunas variables estructurales del producto adquieren mayor protagonismo relativo. Esto sugiere que la lógica del éxito crítico en la plataforma Steam no es estática, sino históricamente variable.

Desde una perspectiva metodológica, el Canonical Biplot demostró ser una herramienta útil para estudiar fenómenos complejos en plataformas digitales porque permite comprender no solo qué variables importan, sino también cómo se relacionan dentro de una estructura multivariante interpretable. Esa es, precisamente, una de las principales contribuciones de este artículo frente a la literatura predominantemente predictiva.

Como línea futura, sería pertinente ampliar la muestra a videojuegos con menor visibilidad, incorporar análisis longitudinales y complementar el modelo con minería de texto de reseñas para integrar de manera más explícita dimensiones cualitativas de la experiencia del jugador y de la crítica especializada.

REFERENCIAS

- [1] A. De Luisa, J. Hartman, D. Nabergoj, S. Pahor, M. Rus, B. Stevanoski, J. Demšar, y E. Štrumbelj, "Predicting the popularity of games on Steam," *arXiv*, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.02896>
- [2] E. Salkanović, N. Zukorlić, L. Oković, y D. Kečo, "A data analysis of Steam's game catalog and diverse recommendation strategies," *International Journal of Computer Applications*, vol. 186, no. 54, pp. 39-49, dic. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.5120/ijca2024924261>
- [3] H. Zhou, "More games, more playtime," *Interdisciplinary Humanities and Communication Studies*, vol. 1, no. 1, jun. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.61173/2y9xnj78>
- [4] X. Li, Z. Zhang, y K. Stefanidis, "A data-driven approach for video game playability analysis based on players' reviews," *Information*, vol. 12, no. 3, mar. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/info12030129>
- [5] H. Ding, "Modeling user behavior online: A comparison of Pareto/NBD and BG/NBD models," *Highlights in Engineering and Technology*, vol. 61, pp. 128-132, jul. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.54097/hset.v61i.10283>
- [6] S. Heidenreich, F. Handrich, y T. Kraemer, "Flawless victory! Investigating search and experience qualities as antecedent predictors of video game success," *Electronic Markets*, vol. 33, no. 1, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12525-023-00647-2>
- [7] T. Kraemer, W. H. Weiger, y S. Heidenreich, "Do all stars shine the same? Investigating the nonlinear effects of user and critic reviews on video game sales," *Journal of Business Research*, vol. 188, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2024.115034>
- [8] J. Pfau, M. Debus, J. Juul, E. Lundedal Hammar, A. Canossa, y M. Seif El-Nasr, "Predicting success factors of video game titles and companies," in *Entertainment Computing - ICEC 2022*, B. Göbl, E. Van Der Spek, J. Baalsrud Hauge, y R. McCall, Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2022, vol. 13477, pp. 269-282. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-031-20212-4_22

- [9] H. Yu, "A comprehensive analysis of game success: Synergy between quality, brand, and market," *Applied and Computational Engineering*, vol. 110, no. 1, pp. 22-28, nov. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.54254/2755-2721/110/2024MELB0101>
- [10] V. Brodschneider, y J. Pirker, "On the influence of reviews on play activity on Steam: A statistical approach," en *2023 IEEE Conference on Games (CoG)*, pp. 1-5, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/CoG57401.2023.10333235>
- [11] D. Chen, "Signals of video game success on Steam: Evidence from Kickstarter campaigns," *Finance Research Letters*, vol. 86, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.frl.2025.108995>
- [12] G. C. Ullmann, C. Politowski, Y.-G. Guéhéneuc, y F. Petrillo, "What makes a game high-rated?: Towards factors of video game success," in *Proc. 6th International CSE Workshop on Games and Software Engineering: Engineering Fun, Inspiration, and Motivation*, Pittsburgh, PA, USA, May 2022, pp. 16-23. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1145/3524494.3527628>
- [13] N. le Roux y S. Gardner-Lubbe, "A two-group canonical variate analysis biplot for an optimal display of both means and cases," *Advances in Data Analysis and Classification*, vol. 19, no. 3, pp. 721-748, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11634-024-00593-7>
- [14] M. N. Rizani, M. N. A. Khalid, y H. Iida, "Application of meta-gaming concept to the publishing platform: Analysis of the Steam games platform," *Information*, vol. 14, no. 2, pp. 110, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/info14020110>
- [15] A. M. Shimaoka, R. C. Ferreira, y A. Goldman, "The evolution of CRISP-DM for data science: Methods, processes and frameworks," *SBC Reviews on Computer Science*, vol. 4, no. 1, pp. 28-43, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.5753/reviews.2024.3757>
- [16] V. Plotnikova, M. Dumas, y F. P. Milani, "Applying the CRISP-DM data mining process in the financial services industry: Elicitation of adaptation requirements," *Data & Knowledge Engineering*, vol. 139, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.datak.2022.102013>
- [17] S. Tripathi, D. Muhr, M. Brunner, H. Jodlbauer, M. Dehmer, y F. Emmert-Streib, "Ensuring the robustness and reliability of data-driven knowledge discovery models in production and manufacturing," *Frontiers in Artificial Intelligence*, vol. 4, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/frai.2021.576892>
- [18] M. Elkabalawy, A. Al-Sakkaf, E. M. Abdelkader, y G. Alfalah, "CRISP-DM-based data-driven approach for building energy prediction utilizing indoor and environmental factors," *Sustainability*, vol. 16, no. 17, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su16177249>
- [19] C. J. F. Ter Braak, P. Smilauer, y S. Dray, "Algorithms and biplots for double constrained correspondence analysis," *Environmental and Ecological Statistics*, vol. 25, no. 2, pp. 171-197, jun. 2018. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10651-017-0395-x>
- [20] L. Wells, K. Thurimella, y S. Bacallado, "Regularised canonical correlation analysis: Graphical lasso, biplots and beyond," *arXiv*, nov. 16, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.02979>
- [21] J. L. Vicente-Villardón, *MultBiplotR: Multivariate Analysis Using Biplots in R*, ver. 23.11.0. CRAN, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://CRAN.R-project.org/package=MultBiplotR>



Experimental Study of Defect Detection in Photovoltaic Panels Using Electroluminescence

(Estudio experimental de la detección de defectos en paneles fotovoltaicos utilizando electroluminiscencia)

Franklin Mauricio Gómez López , Danny Vinicio Ochoa-Correa , Isabel Dolores Cabrera
Carrera

Universidad de Cuenca, Ecuador.

franklin.gomez@ucuenca.edu.ec, danny.ochoac@ucuenca.edu.ec, isabel.cabrera@ucuenca.edu.ec

Abstract: This study presents an experimental investigation of defect detection in monocrystalline and polycrystalline photovoltaic panels using electroluminescence imaging. Twelve modules with varying levels of degradation, deployed in rural Andean installations, were evaluated through visual inspection and automatic analysis based on convolutional neural networks. The methodology included manual defect segmentation and the application of a U-Net model for automatic classification of structural and electrical anomalies. Results showed that fractures and inactive areas were more frequent in monocrystalline panels, whereas potential-induced degradation (PID) and discoloration were mainly observed in polycrystalline ones. The comparison between manual inspection and the automated model demonstrated high performance in detecting discrete defects such as cracks and busbars, although lower accuracy was obtained for diffuse anomalies like PID. Spatial analysis of defect maps revealed the clustering of certain fault types within cell regions, highlighting the importance of considering spatial correlations in future detection algorithms. These findings support the development of targeted preventive maintenance strategies and reinforce the potential of semantic segmentation as a diagnostic tool for photovoltaic modules.

Keywords: Electroluminescence, photovoltaic panels, preventive maintenance, semantic segmentation, U-Net.

Resumen: Este estudio presenta una investigación experimental sobre la detección de defectos en paneles fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos mediante imágenes de electroluminiscencia. Se evaluaron doce módulos con distintos niveles de degradación, instalados en entornos rurales andinos, mediante inspección visual y análisis automático basado en redes neuronales convolucionales. La metodología incluyó la segmentación manual de defectos y la aplicación de un modelo U-Net para la clasificación automática de anomalías estructurales y eléctricas. Los resultados mostraron que las fracturas y áreas inactivas fueron más frecuentes en paneles monocristalinos, mientras que la degradación inducida por potencial (PID) y la decoloración se observaron principalmente en paneles policristalinos. La comparación entre la inspección manual y el modelo automático evidenció un alto desempeño en la detección de defectos discretos como grietas y barras conductoras, aunque con menor precisión en defectos difusos como la PID. El análisis espacial de los mapas de defectos reveló la agrupación de ciertos tipos de fallas dentro de las celdas, destacando la importancia de considerar correlaciones espaciales en futuros algoritmos de detección. Estos hallazgos respaldan el desarrollo de estrategias de mantenimiento preventivo más específicas y refuerzan el potencial de la segmentación semántica como herramienta de diagnóstico para módulos fotovoltaicos.

Palabras clave: Electroluminiscencia, paneles fotovoltaicos, mantenimiento preventivo, segmentación semántica, U-Net.

1. INTRODUCTION

The reliability of photovoltaic (PV) installations depends on the integrity of their components, particularly the condition of individual solar cells within the modules. Over time, degradation mechanisms such as micro-cracks, potential-induced degradation (PID), delamination, discoloration, and metallization layer disruptions compromise the energy yield and operational lifespan of PV systems [1], [2], [3]. Beyond their direct impact on energy yield, these defects also reduce the diagnostic signal-to-noise ratio in imaging workflows and complicate large-scale quality assurance as PV deployment accelerates worldwide [4].

Monocrystalline and polycrystalline silicon modules remain the most widely deployed PV technologies, but they differ in structural characteristics and vulnerability to specific defect types [5]. Several comparative studies have reported variations in performance degradation, thermal behavior, and defect propagation across these two material classes [6]. Understanding how defect types manifest and distribute in each case is essential for improving diagnostic accuracy and guiding maintenance strategies. From an operations standpoint, mixed portfolios that combine mono- and multi-Si modules introduce additional variability for condition monitoring systems; models tuned to one substrate may generalize sub-optimally to the other, which motivates explicit, side-by-side analyses of defect prevalence and appearance across materials.

Electroluminescence (EL) imaging has become a common diagnostic technique to inspect defects that are not visible under standard illumination or thermal imaging. When a forward bias is applied to a PV module in darkness, radiative recombination generates infrared emission that can reveal hidden structural and electrical anomalies [7], [8]. The contrast and resolution of EL images, however, depend on capture conditions, the sensitivity of the camera system, and the severity of the defect. Manual interpretation of EL images also introduces subjectivity and may overlook subtle features. Complementary modalities such as infrared (IR) and RGB imaging are increasingly integrated into inspection pipelines at module and plant scale, where IR assists in locating thermally driven anomalies and RGB highlights surface-level issues like broken glass, discoloration, or delamination, enabling faster triage in field campaigns [4].

In recent years, machine learning approaches, particularly convolutional neural networks (CNNs), have been employed to support automatic defect segmentation and classification. Among these, the U-Net architecture has been applied to PV inspection tasks using electroluminescence imaging, showing encouraging performance in pixel-level detection [9], [10], [11]. Despite these advancements, few studies have examined whether model performance or defect detection outcomes vary when applied to different module types. A systematic comparison between monocrystalline and polycrystalline panels—using both visual and automated inspection methods—remains limited in current literature.

Recent surveys emphasize a shift from handcrafted feature pipelines toward end-to-end CNNs for EL image analysis, while underscoring persistent challenges: defect diversity, scale variation, class imbalance, and domain shifts between laboratory and field data [12].

To mitigate data scarcity, synthetic EL datasets produced with deep convolutional generative adversarial networks (DCGANs) have been introduced, reaching quality indicators (e.g., Inception Score and FID) that support their use to augment training sets and to probe the relationship between image patterns and electrical performance via learned regressors [13].

At the detector level, one-stage architectures (e.g., YOLOv5) combined with tailored loss functions—such as focal and efficient IoU (EIoU) variants—have shown gains in mean average precision for multi-class EL defect detection, particularly under class imbalance and scale heterogeneity [14].

This study presents an experimental evaluation of defect detection in monocrystalline and polycrystalline PV panels using EL imaging. Manual and U-Net-based inspections are performed

on a shared dataset, enabling a comparative assessment of defect type prevalence, spatial distribution, and detection accuracy across material types. The work also analyzes how common degradation modes manifest differently in each case, contributing to the development of more targeted inspection and maintenance protocols for silicon-based PV modules.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Panel samples and degradation overview

The experimental study was conducted on a set of 12 PV panels, including six monocrystalline and six polycrystalline modules, representative of systems deployed in rural Andean installations. Technical specifications of the modules are presented in Table 1. All panels exhibited varying degrees of physical and electrical degradation, with service durations ranging from 5 to 10 years under typical field conditions. Experimental evaluations were conducted at the Microgrid Laboratory of the University of Cuenca, Ecuador [15].

Table 1. Specifications of tested PV modules.

Type	Model	$P_{max}(W)$	Service(yrs)
Monocrystalline	Heckert NeMo 60 P260	260	7
Polycrystalline	Canadian Solar CS6P-250P	250	8

Visual inspections and EL imaging revealed a wide range of degradation patterns, classified according to IEC 61215 [16]. Observed modes included interconnect ribbon corrosion, solder bond failure, cell cracks, PID, busbar interruptions, and discoloration due to encapsulant browning.

Figure 1 illustrates the representative degradation patterns found in the samples. Figure 1(a) shows severe encapsulant discoloration (browning) concentrated in the active cell areas, a typical sign of chemical degradation due to UV exposure. Figure 1(b) highlights external factors such as accumulated dust along the frames and localized bird droppings, which induce partial shading. Additionally, Figure 1(c) reveals oxidation. It is important to note that while these defects were identifiable through visual inspection, structural fractures and microcracks remained invisible to the naked eye, necessitating the subsequent use of electroluminescence imaging for their detection.

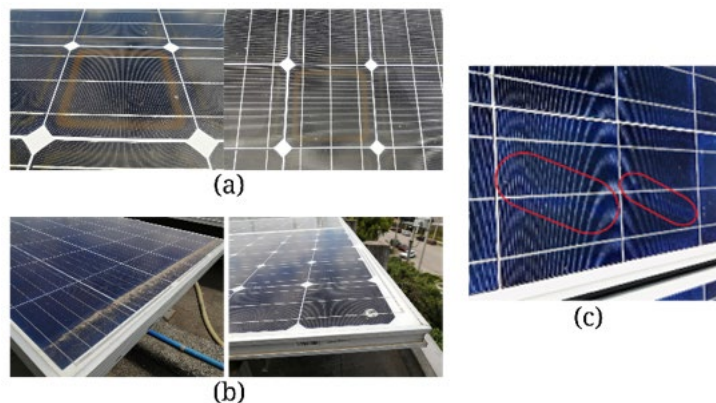


Figure 1. Visible degradation observed during physical inspection: (a) Encapsulant discoloration (browning) in the center of the cells; (b) Soiling accumulation and bird droppings on the glass surface; (c) Signs of corrosion.

2.2. Image acquisition and experimental setup

The EL image acquisition process was conducted in a darkroom to minimize ambient interference. Each module was forward-biased using a programmable Chroma DC power supply to induce electroluminescence, with polarization currents set to approximately 6 A (two-thirds of I_{SC}). The camera used was an OWL 640 M model equipped with an InGaAs sensor, sensitive to the 900–1700 nm wavelength range.

Images were captured using the XCAP-Std software with the following configuration: exposure time between 30–50 ms, digital gain factor of 2.5, and three-point non-uniformity correction (offset, gain, dark). Figure 2 shows the laboratory setup used during the inspection process.

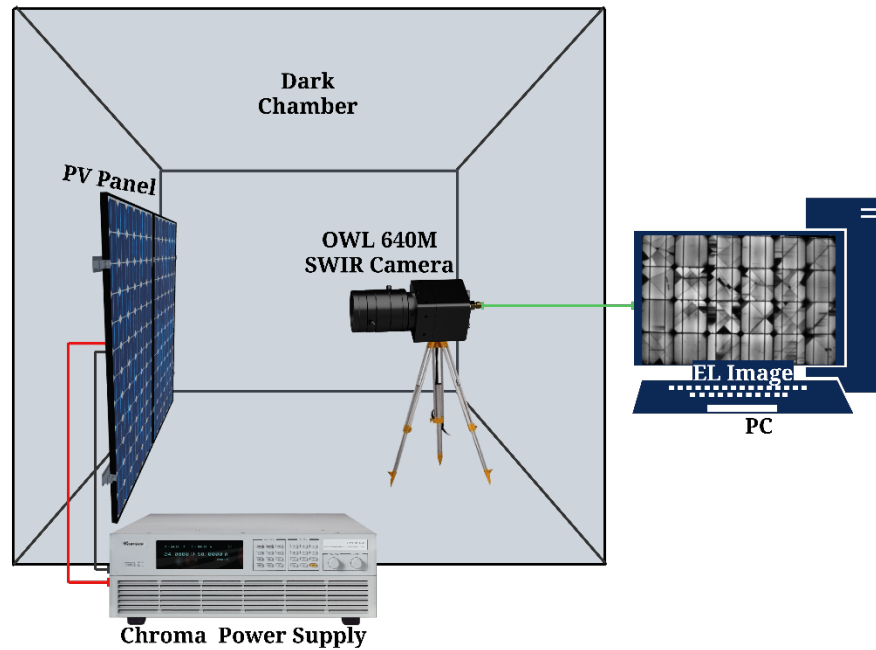


Figure 2. Experimental setup showing the EL imaging system in the darkroom environment.

2.3. Ground Truth generation via visual inspection

To establish a reliable reference for supervised learning, a rigorous visual inspection was conducted solely to generate the Ground Truth dataset. Each EL image was segmented into individual cells and independently evaluated by three expert reviewers. The classification process labeled four main defect categories: cell breaks (visible micro-cracks disrupting current flow), PID (darker areas with reduced luminescence), discoloration (localized dimming due to aging), and finger interruptions (breaks in metallization lines). The manual annotations were recorded and cross-validated among reviewers to create the final target masks used for training and evaluating the automated system.

2.4. U-Net based semantic segmentation

Automatic defect detection was implemented using a U-Net architecture, trained on the annotated dataset derived from the visual inspection phase. The input consisted of preprocessed EL images, standardized in resolution and contrast.

The network consisted of four encoder-decoder levels, using ReLU activation and dropout layers for regularization. The dataset was split into 70% training, 15% validation, and 15% testing. The training outcomes, including F1 score, recall, and precision, are summarized in Table 2, which presents the performance metrics obtained for the optimized U-Net_V32 model.

Table 2. Training performance of U-Net_V32.

Model Version	F1 Score	Recall	Precision
U-Net_V32	0.9064	0.9066	0.8714

2.5. Implementation details and reproducibility

The U-Net models were implemented using the PyTorch framework (v2.3.1). Training and inference procedures were executed on the Google Colab Pro platform, utilizing an NVIDIA T4 GPU with 16 GB of VRAM. The input EL images were resized to 256×256 pixels using bilinear interpolation to preserve spatial details, while nearest-neighbor interpolation was applied to the ground truth masks to maintain class integrity.

The training process employed the Adam optimizer with an initial learning rate of 0.0018 and a batch size of 16 samples. A cross-entropy loss function was minimized over 48 epochs, with a step-based learning rate decay (factor of 0.05 every 8 epochs) to facilitate convergence. Under this configuration, the average inference time was approximately 32 ms per image, demonstrating the model's feasibility for high-throughput processing in industrial scenarios.

2.6. Evaluation metrics

Model performance was evaluated using pixel-based accuracy, Dice score, and class-level recall. These metrics were computed for each defect category on mono and polycrystalline modules independently. Statistical comparison between module types was conducted using paired t-tests to assess differences in segmentation accuracy.

Defect frequency maps and classification heatmaps were also generated to visualize spatial distribution, as discussed further in the next section.

3. RESULTS

3.1. Defect frequency and type distribution

A total of 142 cells were evaluated through visual inspection using EL imagery. The breakdown of defect types across three tested PV modules is presented in Table 3. The most frequently detected issues were material anomalies and conductor finger interruptions. The presence of PID was exclusive to polycrystalline modules, while contact interruptions were absent in monocrystalline samples.

Table 3. Visually identified defects per module.

Module Type	Material Anomalies	Contact Interruptions	Finger Interruptions	PID
Monocrystalline	11 cells	0	24 cells	18
Polycrystalline 1	25 cells	11 cells	0	14
Polycrystalline 2	25 cells	11 cells	0	11

3.2. Automatic detection results

The segmentation model was trained to identify three categories—conductor bars, cracks, and inactive dark zones—using expert-generated Ground Truth masks as the reference for supervised learning and evaluation. Table 4 presents a clear, class-by-class quantitative comparison of the U-Net_V32 performance using precision, recall, and F1-score. In particular, the final model (U-Net_V32) achieved an F1-score of 0.9083 for conductor bar detection, 0.6557 for crack identification, and 0.6466 for inactive-zone segmentation. In addition to these aggregated metrics, Figure 4 provides a qualitative, pixel-level comparison between the Ground Truth masks and the U-Net_V32 predictions, including error maps that distinguish false positives (FP) and false

negatives (FN), thereby highlighting where the model agrees with the manual annotations and where discrepancies occur.

Table 4. Performance metrics for U-Net_V32.

Defect Category	Precision	Recall	F1 Score
Conductor Bars	0.9151	0.9031	0.9083
Cracks	0.6794	0.6465	0.6557
Inactive Zones	0.6643	0.6443	0.6466

3.3. Spatial patterns of defects

Figure 3 illustrates three distinct heatmaps showing the spatial distribution of predictions for busbars, cracks, and dark zones on monocrystalline modules. The heatmap for busbars demonstrates their consistent and localized presence within the module. In contrast, the heatmaps for cracks and dark zones reveal that these defects had a higher occurrence in the central regions of the cells. The co-occurrence matrix, shown in Figure 4, highlights the conditional presence of multiple defect types in the same cell regions.

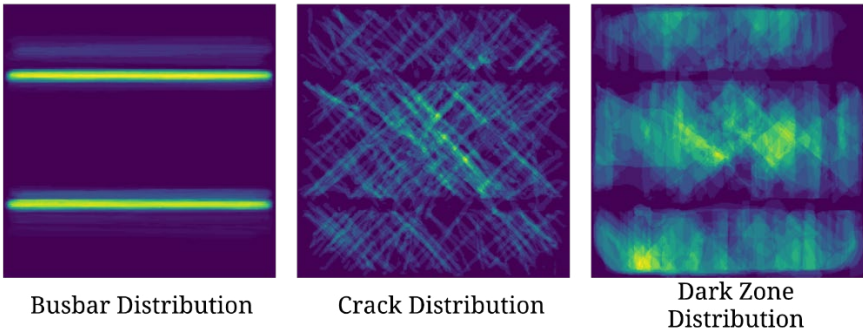


Figure 3. Heatmaps showing defect distribution across cells in monocrystalline module.

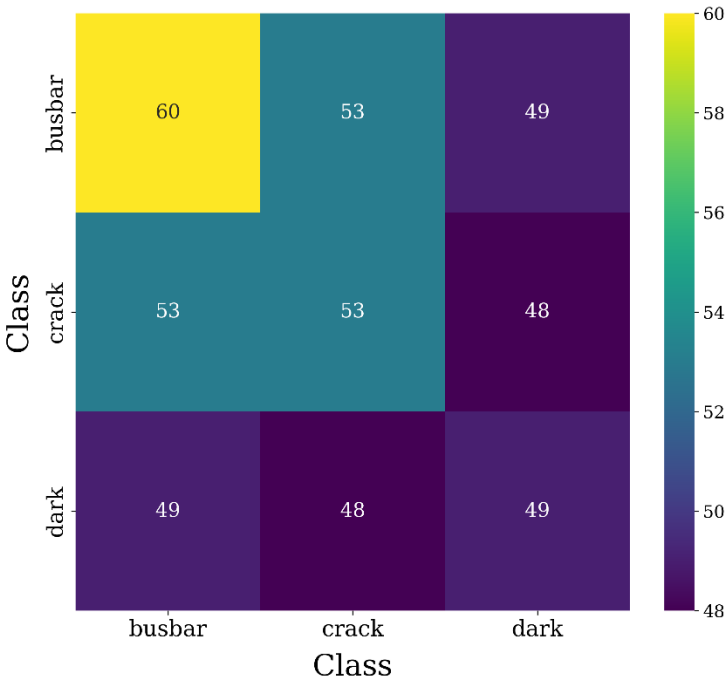


Figure 4. Co-occurrence matrix of defects in monocrystalline cells.

3.4. Case studies

To assess model accuracy at the image level, a representative cell was manually annotated and its predicted segmentations were compared. Figure 5 shows a visual comparison of U-Net_V32 predictions against manual annotations for the cracks, dark zones, and busbar defects within this single cell. The figure also includes error maps, highlighting false positives and false negatives for each defect type. The U-Net_V32 model demonstrated proficiency in identifying microcracks not marked by the manual classifier, suggesting that EL signal attenuation can be captured algorithmically even when visually imperceptible. However, it occasionally misclassified encapsulant delamination artifacts as inactive zones.

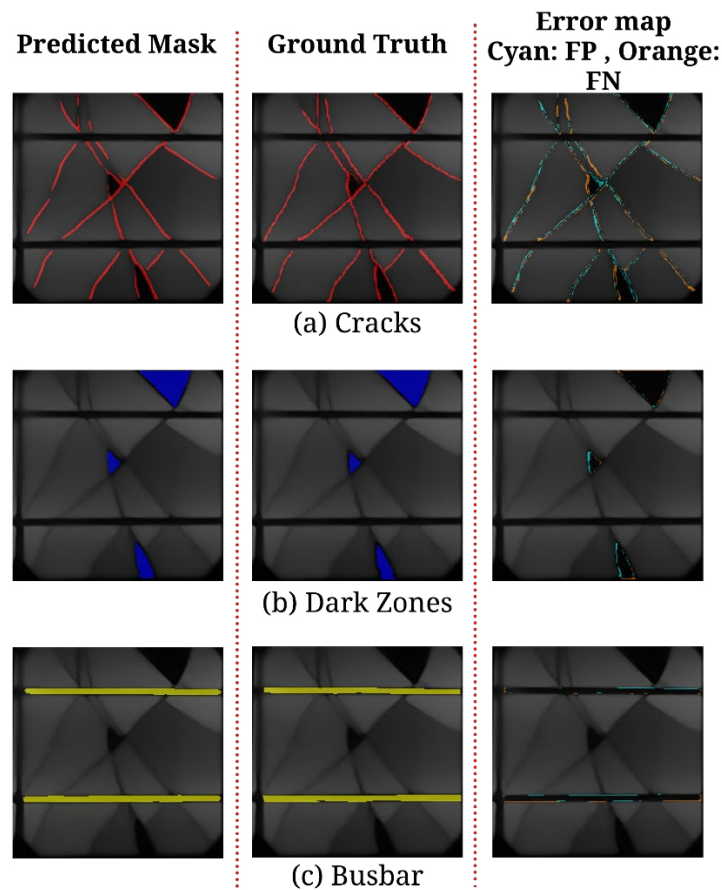


Figure 5. Qualitative comparison of segmentation performance. Each row corresponds to a specific defect class: (a) Cracks, (b) Dark Zones, and (c) Busbars. The columns display the U-Net prediction, the Ground Truth (manual annotation), and the spatial Error Map. In the error maps, Cyan pixels represent False Positives (over-segmentation), while Orange pixels indicate False Negatives (missed defects).

4. DISCUSSION

The results provide multiple layers of interpretation regarding the classification of defects in PV modules through EL imaging. One of the central observations is the disparity in defect prevalence between mono- and polycrystalline modules. Although both types exhibited broken cells, inactive regions, and discoloration, fractures were especially concentrated in monocrystalline samples. This trend is consistent with the higher structural uniformity of mono-Si wafers, which tend to propagate mechanical stress more efficiently. Conversely, PID and snail

trails were more commonly detected in polycrystalline modules, indicating distinct degradation pathways influenced by material properties and manufacturing conditions.

The defect maps and co-occurrence matrices reinforce these findings. As shown in Figure 3, defects such as cracks and dark zones appeared concurrently in multiple cells, suggesting spatial clustering. In mono modules, 48 cells were simultaneously marked with cracks and inactive areas. These results emphasize the importance of including spatial correlation when developing defect detection algorithms, particularly for defect classes that emerge in proximity.

The automatic segmentation achieved through U-Net produced consistent predictions across several categories, with high F1 scores for crack detection and busbar alignment. However, performance varied by defect type. For example, the identification of PID was less accurate, possibly due to its diffuse appearance and lower contrast under EL. These outcomes align with findings from previous studies that highlight the difficulties of detecting uniform degradation patterns compared to discrete faults such as fractures or inactive zones.

Compared with prior EL-based inspection studies that focus primarily on reporting segmentation accuracy, the present work adds three practical elements that become relevant under real field conditions. First, the dataset is built from mono- and polycrystalline modules with degradation accumulated in service (rather than controlled laboratory aging), which exposes the model to realistic variability in soiling, corrosion, and encapsulant discoloration that can interfere with EL interpretation. Second, the Ground Truth was generated through cross-validated expert annotations, and the evaluation is explicitly anchored to a pixel-level comparison (including FP/FN error maps), enabling a more transparent identification of failure modes rather than relying only on aggregate scores. Third, beyond per-class metrics, the study analyzes the spatial organization of defects (co-occurrence and clustering), showing that cracks and inactive regions often appear jointly within neighboring cells; information that can be integrated into inspection workflows to prioritize modules or strings for targeted maintenance and further testing.

When comparing manual and automatic assessments, qualitative agreement was observed in most annotated panels. Nonetheless, certain cases showed undersegmentation by the model, especially for defects located at the edges or overlapping with frame artifacts. These discrepancies underline the importance of training with representative samples that include peripheral and partially obscured defects.

Limitations in the current implementation stem from the relatively small annotated dataset and the fixed architecture of the segmentation model. Although the version trained (U-Net_V32) was optimized with adjusted filters and skip connections, future work should examine ensemble strategies or hybrid approaches that merge multiple model outputs. Additionally, data augmentation strategies could be enhanced to simulate edge-based distortions and noise patterns encountered in real field conditions.

5. CONCLUSIONS

This study evaluated the detection of structural and electrical defects in mono- and polycrystalline PV panels through EL imaging combined with U-Net-based semantic segmentation. A comparative analysis revealed that fractures and inactive areas were more frequent in monocrystalline modules, whereas PID and surface discoloration appeared predominantly in polycrystalline ones.

Manual inspection protocols were cross-validated with automated segmentation outputs. Using expert-generated Ground Truth masks as the reference, the final U-Net version (U-Net_V32) provided a clear class-by-class performance, achieving an F1-score of 0.9083 for conductor bar (busbar) detection, 0.6557 for crack identification, and 0.6466 for inactive-zone segmentation. The model achieved strong F1 performance on discrete defects such as cracks and

disconnected busbars, but underperformed in detecting diffuse anomalies like PID. This indicates that CNN-based segmentation can support diagnostic assessments, provided that training datasets cover sufficient variation in defect morphology and imaging artifacts.

The spatial distribution analysis confirmed that certain defects appear in clusters, especially in mono panels, highlighting the relevance of incorporating spatial information into diagnostic workflows. Although the model correctly classified most defect types, limitations remain in handling image boundaries and overlapping noise patterns. In practical terms, these results support the use of EL-driven segmentation as a screening tool to prioritize modules for further inspection, while emphasizing that improved labeling diversity and artifact-aware training are needed to increase reliability for low-contrast and diffuse degradation signatures (e.g., PID).

The findings of this study also emphasize the industrial applicability of EL-based segmentation for enhancing preventive maintenance strategies in photovoltaic systems. The model's ability to prioritize modules for inspection based on defect severity offers significant potential for optimizing maintenance schedules and reducing operational downtime in large-scale PV installations.

In terms of scalability, the methodology can be expanded to handle larger datasets by leveraging batch processing and incremental model training, ensuring that it remains feasible for wide-scale deployment in the industry. Additionally, this framework can be adapted to different PV technologies and expanded to include additional defect categories.

Future work should focus on extending the training dataset, improving edge-specific augmentation strategies, and integrating temporal EL imaging for defect tracking. Further improvements in the training process could include hybrid and ensemble approaches, as well as better artifact handling through more diverse and realistic training data. Overall, the methodology supports a structured framework for comparing degradation patterns across different PV technologies and contributes to enhancing inspection strategies for preventive maintenance.

ACKNOWLEDGMENTS: The authors thank Universidad de Cuenca for easing access to the facilities of the Microgrid Laboratory of the Faculty of Engineering, for allowing the use of its equipment, and for authorizing its staff the provision of technical support necessary to carry out the experiments described in this article.

REFERENCES

- [1] R. Zhang *et al.*, “Optimizing PV Panel Segmentation in Complex Environments Using Pre-Training and Simulated Annealing Algorithm: The JSWPVI”, *Land*, vol. 14, no. 6, jun. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/land14061245>
- [2] H. Munawer Al-Otum, “Deep learning-based automated defect classification in Electroluminescence images of solar panels”, *Adv. Eng. Inform.*, vol. 58, oct. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102147>
- [3] A. El-Tayeb, F. Li, A. Kumar, y G. Tamizhmani, “Electrical Impedance Spectroscopy: A Complementary Approach Differentiating PID Mechanisms in Photovoltaics”, *Electronics*, vol. 14, no. 5, pp. 1021, mar. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics14051021>
- [4] D. Matusz-Kalász, I. Bodnár, y M. Jobbágy, “An Overview of CNN-Based Image Analysis in Solar Cells, Photovoltaic Modules, and Power Plants”, *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 10, pp. 5511, jan. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app15105511>
- [5] A. Tihane, M. Boulaid, A. Elfanaoui, M. Nya, y A. Ihlal, “Performance analysis of mono and poly-crystalline silicon photovoltaic modules under Agadir climatic conditions in

- Morocco”, *Mater. Today Proc.*, vol. 24, pp. 85-90, jan. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.620>
- [6] M. Köntges, S. Kurtz, C. Packard, U. Jahn, K. A. Berger, y K. Kato, *Performance and reliability of photovoltaic systems: subtask 3.2: Review of failures of photovoltaic modules: IEA PVPS task 13: external final report IEA-PVPS*. Sankt Ursen: International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Programme, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2314/GBV:856979287>
- [7] T. Fuyuki, H. Kondo, T. Yamazaki, Y. Takahashi, y Y. Uraoka, “Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon solar cells by electroluminescence”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, no. 26, pp. 262108, jun. 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.1978979>
- [8] Y. Zhang, R. Wang, F. Wang, D. Zhu, X. Gong, y X. Cheng, “Electroluminescence as a Tool to Study the Polarization Characteristics and Generation Mechanism in Silicon PV Panels”, *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 3, pp. 1591, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app13031591>
- [9] R. A. M. Rudro *et al.*, “SPF-Net: Solar panel fault detection using U-Net based deep learning image classification”, *Energy Rep.*, vol. 12, pp. 1580-1594, dic. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.07.044>
- [10] F. Gómez-López, D. Ochoa-Correa, y I. Cabrera-Carrera, “U-Net–based semantic segmentation of defects in photovoltaic panels”, *Ingenius*, no. 35, pp. 110-121, jan. 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n35.2026.08>
- [11] A. B. Alao, O. M. Adeyanju, M. Chamana, S. Bayne, y A. Bilbao, “Photovoltaic Farm Power Generation Forecast Using Photovoltaic Battery Model with Machine Learning Capabilities”, *Solar*, vol. 5, no. 2, p. 26, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/solar5020026>
- [12] T. Hussain, M. Hussain, H. Al-Aqrabi, T. Alsoubi, y R. Hill, “A Review on Defect Detection of Electroluminescence-Based Photovoltaic Cell Surface Images Using Computer Vision”, *Energies*, vol. 16, no. 10, pp. 4012, ene. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en16104012>
- [13] H. F. M. Romero *et al.*, “Synthetic Dataset of Electroluminescence Images of Photovoltaic Cells by Deep Convolutional Generative Adversarial Networks”, *Sustainability*, vol. 15, no. 9, jan. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su15097175>
- [14] S. Ding, W. Jing, H. Chen, y C. Chen, “Yolo Based Defects Detection Algorithm for EL in PV Modules with Focal and Efficient IoU Loss”, *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 17, pp. 7493, jan. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app14177493>
- [15] J. L. Espinoza, L. G. González, y R. Sempértegui, “Micro Grid Laboratory as a Tool for Research on Non-Conventional Energy Sources in Ecuador”, en *2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 2017, pp. 1-7. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ROPEC.2017.8261615>
- [16] International Electrotechnical Commission, “IEC 61215-1:2016 - Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules – Design Qualification and Type Approval – Part 1: Test Requirements”. 2016. [Online]. Available: <https://www.iecee.org/certification/iec-standards/iec-61215-12021>



Brechas regulatorias en agua y saneamiento en Ecuador: aplicación de la metodología WASHREG

(Regulatory Gaps in Water and Sanitation in Ecuador: Application of the WASHREG Methodology)

Sara Brigitte Barbosa Santacruz, Elizabeth Lucrecia Vargas Zuñiga, Jesús Enrique Chavarría
Párraga

Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Portoviejo, Ecuador.
sbbarbosa@pucesm.edu.ec, elvargas@pucesm.edu.ec, jechavarria@pucesm.edu.ec

Resumen: El acceso al agua potable y al saneamiento en el Ecuador presenta limitaciones en términos de calidad, cobertura y efectividad regulatoria, evidenciando que el 29,9 % de la población no accede a agua segura y el 14,1 % carece de saneamiento básico. Por ende, el presente estudio tiene como objetivo analizar las brechas en la regulación del sector a través de la aplicación del enfoque WASHREG. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cualitativo descriptivo y analítico, mediante la revisión de la normativa vigente, informes institucionales y literatura especializada complementada con entrevistas semiestructuradas a cinco expertos del sector académico, técnico e institucional. Los resultados evidencian que, aunque el país cuenta con un marco normativo amplio y con un organismo regulador consolidado, persisten las brechas en la implementación en las fases de monitoreo, control y aplicación de sanciones. Se identificaron debilidades en áreas como protección al consumidor y salud pública, con mayor impacto en zonas rurales. Se concluye que el principal problema radica en la gobernanza regulatoria más que en la ausencia de normativa, por ello, se recomienda fortalecer los mecanismos de supervisión, mejorar la gestión de información y promover los ajustes regulatorios a la eficiencia y sostenibilidad del servicio.

Palabras clave: Gobernanza regulatoria, monitoreo y control, normativa del Ecuador, calidad del servicio

Abstract: Access to safe drinking water and sanitation in Ecuador is limited in terms of quality, coverage, and regulatory effectiveness, as evidenced by the fact that 29,9% of the population lacks access to safe water and 14,1% lacks basic sanitation. Therefore, this study aims to analyze gaps in the sector's regulation through the application of the WASHREG approach. The research was conducted using a qualitative, descriptive, and analytical approach, involving a review of current regulations, institutional reports, and specialized literature, supplemented by semi-structured interviews with five experts from the academic, technical, and institutional sectors. The results show that, although the country has a comprehensive regulatory framework and a well-established regulatory body, gaps persist in implementation during the monitoring, control, and enforcement phases. Deficiencies were identified in areas such as consumer protection and public health, with the greatest impact felt in rural areas. The report concludes that the main problem lies in regulatory governance rather than in the absence of regulations; therefore, it recommends strengthening oversight mechanisms, improving information management, and promoting regulatory adjustments to enhance the efficiency and sustainability of the service.

Keywords: Regulatory governance, monitoring and control, regulations of Ecuador, service quality.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural no renovable, indispensable para la vida, que se ve amenazado por la constante contaminación y mal uso, reflejándose en los consumos inadecuados del líquido

vital por parte de los seres humanos, haciendo que se vuelva cada vez más escaso. En el Ecuador el 70,1 % de la población dispone de agua segura y el 85,9 % cuenta con servicios de saneamiento básico. No obstante, es necesario diferenciar entre el acceso físico y el acceso seguro: aproximadamente el 8,0 % de la población no cuenta con infraestructura de acceso al agua, mientras que cerca del 29,9 % no accede a este recurso en condiciones adecuadas de calidad, continuidad y potabilidad; esta situación evidencia que la problemática no se limita a la cobertura, sino que involucra la calidad del servicio [1].

Se estima que aproximadamente 2.200 millones de habitantes carecen de acceso a agua potable segura; en tal sentido, 3 de cada 10 personas no tienen acceso al agua, mientras que 6 de cada 10 carecen de servicio de saneamiento. Además, la escasez de este recurso afecta a más del 40 % de la población a nivel mundial. Para las proyecciones del año 2040 a nivel mundial se prevé un aumento de la demanda del agua en más del 50 % [2].

En respuesta a esta problemática, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) estableció el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6, que busca expandir y asegurar el acceso a los servicios de agua y saneamiento a la población de forma segura. Ecuador, a finales del 2015 se comprometió a integrar los postulados de la ODS en el Plan Nacional de Desarrollo [1].

El ODS número 6 “Agua limpia y saneamiento”, consiguió un avance importante en el acceso al agua potable y saneamiento, pero millones de personas todavía carecen de servicios básicos en las zonas rurales. Este aspecto fue dado a conocer en la Agenda 2030 de la ONU, debido a que 1 de cada 3 personas no tienen acceso al agua potable de calidad y 2 de cada 5 personas en el mundo no disponen de instalaciones básicas o suministros para la buena potabilidad del agua [3].

En el ámbito nacional, a través del decreto oficial del 27 de noviembre de 2013, se creó la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), entidad encargada de regular y supervisar la gestión integral de los recursos hídricos, incluyendo la calidad y cantidad del agua, así como la prestación de los servicios públicos asociados. Esta institución forma parte del marco de gobernanza del recurso hídrico en el país, el cual ha experimentado procesos de reorganización institucional en los últimos años, particularmente con la evaluación del Ministerio del Ambiente, agua y Transición Ecológica hacia nuevas estructuras administrativas orientadas a una gestión más integrada del agua y la energía [4].

El saneamiento deficiente y la contaminación del agua son responsables de enfermedades como el cólera, la disentería, la hepatitis A y la fiebre tifoidea, que se transmiten por medio de la ingesta de agua contaminada. En este contexto, aumenta el riesgo de contraer enfermedades que ponen en riesgo la vida de las personas, en especial la de los niños. Además, los constantes cambios ambientales, el aumento de la población y la contaminación del agua hacen que el sistema hídrico nacional sea vulnerable [5].

Un estudio realizado por Bravo Coello *et al.* [6] identificó que en las localidades rurales el 70 % de los sistemas de saneamiento tienden a fallar después de 2 años de haberse construido debido a la falta de mantenimiento del órgano regulador, lo que conlleva a la disminución de la salud pública y ambiental resultando un aumento en los costes económicos para subsanar estos problemas. Este problema de suministro de agua potable y saneamiento en las localidades rurales se debe abarcar individualmente para reconocer las limitantes existentes. Dichos factores, sumados a los contextos sociales, geográficos y políticos, conllevan a que la inclusión de enfoques como WASHREG fracasen cuando se replican en contextos similares. Sin embargo, es necesario concebir que los sistemas de saneamiento son sistemas complejos que interactúan con una vasta red de sistemas humanos.

Según el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF), quien se encarga de promover y hacer cumplir los derechos de los niños, niñas y adolescentes, el acceso, disponibilidad y calidad del agua segura para beber en los hogares a nivel nacional es de 34,96 %, en el ámbito

rural el 36,32 %, mientras que en la región Amazónica es del 28,64 %. Estos datos señalan que la región amazónica posee mayores problemas de calidad de agua, mientras que en la región de la Sierra se identifica la poca disponibilidad al servicio de agua potable. Además, un estudio realizado por Molina-Vera *et al.* [7], muestra un escenario desalentador con cifras por debajo de la media, teniendo así que solo el 9 % del total de todos los cantones del país cuenta con cobertura del 80 %.

Las organizaciones comunitarias son clave para la implementación de estrategias establecidas para la paridad de género en los distintos niveles del sistema nacional estratégico del agua en el Ecuador. Entonces, la LORHUyA menciona que: “Todas las personas ejercerán el derecho humano al agua en condiciones de igualdad. Se prohíbe toda discriminación por motivos de etnia, sexo, edad, idioma, religión, opinión política o de otra índole, origen nacional o social, posición económica, orientación sexual, estado civil u otro tipo de condición que pretenda menospreciar el igual disfrute del derecho al agua” [8]. Por lo tanto, son la única instancia de gestión en la zona rural, sector con el peor acceso al agua potable en el país; por ende, se requiere un adecuado marco regulatorio específicamente en lo tributario y laboral porque estas organizaciones tienen lógicas económicas diferentes.

En 2020 un estudio realizado por Espés-Pizarro [10] mencionó que el acceso al suministro de agua mejorada de red u otras fuentes mejoradas alcanzó el 91,2 % de la población y el saneamiento mejorado alcanzó el 96,8 % de los habitantes. Sin embargo, aún existen zonas por cubrir como las poblaciones indígenas y amazónicas que conforman la de escasos recursos financieros y humanos, dando a entender que solo el 45,5 % recibe agua en sus domicilios. Además, solo el 75 % de los ecuatorianos recibe agua segura; es decir, agua sin contaminación fecal, suficiente y con fuentes mejoradas [9].

Según ARCA [11] en 2023 se presentó el benchmarking de los prestadores públicos de los servicios de agua potable y saneamiento en Ecuador, donde de los 221 prestadores de servicio 22 se ubican en la categoría A con un nivel eficiente, 60 en la categoría B con un nivel bueno, 101 se encuentran en la categoría C con un nivel Aceptable, 30 para la categoría D con un nivel regular y 9 prestadores de servicio en la categoría E de nivel deficiente. Estas categorías representan el nivel de servicio agua potable, por lo tanto, el promedio nacional para este nivel es de 77,60%, mientras que servicio de alcantarillado alcanza los 58,06% [10].

El costo económico relacionado al acceso deficiente al agua potable y saneamiento básico es equivalente a \$2,3 billones de dólares lo que equivale al 2,3% del producto interno bruto (PIB) a nivel nacional [11]. El mayor impacto de este efecto vienen del área de la salud con un valor de \$1,3 billones que son relacionados con costos en atención médica, tratamiento u hospitalización, además de gestión de recursos hídricos especialmente en costos de tratamiento y acarreo del agua [11].

Estas realidades llevan a plantear preguntas sobre el estado de la regulación del sector de agua potable y saneamiento en Ecuador, si las regulaciones emitidas son herramientas eficientes, o si es necesario ajustes a las regulaciones y el control. Por ello, este trabajo está centrado en el estudio de los avances que existen en la regulación del sector de agua y saneamiento, adaptando el enfoque WASHREG para el contexto del Ecuador.

2. METODOLOGÍA

El enfoque WASHREG desarrollado por el Instituto Internacional del Agua de Estocolmo (SIWI) [12] se usa para identificar brechas en la regulación nacional y las dificultades que tiene la prestación de servicios de agua y saneamiento. Este enfoque se concibe como un proceso participativo que involucra a instituciones gubernamentales, organismos reguladores, actores del sector y otras partes interesadas, con el objetivo de definir una hoja de ruta orientada al fortalecimiento de la regulación del sector WASH.

La implementación del enfoque WASHREG permite estructurar el análisis en torno a tres facultades regulatorias fundamentales: i) definición de reglas y aprobación de normas, ii) monitoreo e información, y iii) aplicación de las normas. Estas facultades se evalúan en función de su aplicación dentro de áreas regulatorias clave, tales como la calidad del servicio, la protección al consumidor, el establecimiento de tarifas, la competencia, el medio ambiente y la salud pública, tal como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Definición de las áreas regulatorias de análisis en el enfoque WASHREG [12].

Áreas regulatorias	Descripción/Objetivo
Regulación de la calidad del servicio	Establecer criterios tales como recopilación de datos e indicadores, establecer indicadores y procedimientos para brindar un buen servicio, llevar auditorías a los operadores para que cumplan los servicios para reflejar adecuadamente las necesidades del consumidor.
Protección al consumidor	Los organismos de regulación establecen políticas de protección al consumidor, medidas claras que reflejan información sobre la regulación de precios, facturación, deudas y suspensión con respecto al suministro y saneamiento de agua.
Establecimiento de tarifas	El organismo regulador puede establecer o aprobar tarifas según los criterios y procedimientos claros, además, los principios de recuperación de costos de inversión e inversión. El establecer una tarifa implica la participación de las partes interesadas.
Competencia¹	El mercado público y privado está regulado mayormente por el gobierno o autoridad competente, el cual garantiza las condiciones equitativas para todos competidores con criterios claros y procedimientos adecuados en contexto de las reglas que se obliga a cumplir.
Medio ambiente	Son regulaciones estándar que se deben cumplir con las políticas nacionales a través de directrices, pautas y marcos con el objetivo de proteger el medio ambiente de sustancias nocivas que perjudiquen el servicio de agua. Implementando normas, lista de sustancias, límites permisibles para aguas residuales, industriales o agrícolas.
Salud pública	Establecen los límites o requisitos mínimos que deben cumplir la calidad del agua en base a valores referenciados recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Nota. Adaptado de [12]. La tabla presenta las principales áreas regulatorias del enfoque WASHREG, orientadas a la gestión de los servicios de agua y saneamiento.

¹ Para el caso de Ecuador no aplica el área regulatoria "Competencia" ya que en Ecuador la prestación del servicio de agua potable y saneamiento es público o comunitario.

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cualitativo de carácter analítico, estructurado en tres fases:

Fase I: Identificación de contextos regulatorios

En esta fase se examinó información secundaria disponible sobre la regulación del sector. Se revisaron leyes, reglamentos, resoluciones de ARCA y otros organismos relacionados, informes técnicos y estudios previos sobre la prestación de servicios de agua potable y saneamiento. A partir del marco WASHREG se organizaron los contenidos en tres facultades regulatorias (definición de normas, monitoreo e información y aplicación de normas) y cinco áreas de análisis: calidad del servicio, protección al consumidor, establecimiento de tarifas, criterios medioambientales y salud pública. Con esta base se elaboró un análisis preliminar de responsabilidades regulatorias, identificando qué entidad ejerce cada función, qué instrumentos normativos la respaldan y cuáles eran las principales brechas señaladas en la literatura. Esta información permitió definir los escenarios iniciales sobre el grado esperado de efectividad de la regulación.

Fase II: Levantamiento de información

En esta etapa se recopiló información primaria mediante cinco entrevistas estructuradas, una vez a cada persona, en un periodo de cinco días. Los entrevistados fueron actores del sector privado con experiencia en la prestación de servicios de agua potable y saneamiento, funcionarios del sector público (MAATE) y de la academia, así como profesionales que han trabajado previamente en la ex-SENAGUA. Todos cuentan con experiencia técnica o de gestión en el sector, lo que permitió obtener una visión informada sobre el funcionamiento del marco regulatorio (Tabla 2).

Tabla 2. Características de los entrevistados.

Característica	Descripción
Número total de entrevistas	5 entrevistas individuales, estructuradas
Número de aplicaciones por persona	Una aplicación por entrevistado
Periodo de aplicación	Ventana de 5 días consecutivos
Sectores representados	Sector privado vinculado a servicios de agua y saneamiento; Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE); academia (universidades); profesionales con experiencia previa en la ex-SENAGUA
Criterio principal de selección	Conocimiento técnico y experiencia laboral directa en regulación, gestión o supervisión de servicios de agua potable y saneamiento
Tipo de información obtenida	Percepción sobre nivel de cumplimiento de las regulaciones, identificación de brechas por facultad y área regulatoria, y propuestas de mejora

La selección de los participantes se realizó mediante un muestreo intencional, considerando un total de cinco expertos con experiencia relevante en el ámbito académico, técnico e

institucional. Esta muestra se considera pertinente para un diagnóstico cualitativo, debido a que los participantes ocupan roles estratégicos en la toma de decisiones, investigación y gestión del sector, lo que garantiza la obtención de la información especializada y contextualizada.

El instrumento de recolección de datos consistió en una guía de entrevista estructurada en función de los criterios del enfoque WASHREG; ya que dicho instrumento fue diseñado tomando como base el manual metodológico propuesto por SIWI [12], y adaptado al contexto ecuatoriano. Además, fue sometido a validación a través de juicios expertos, con el fin de garantizar la pertinencia, claridad y coherencia de las preguntas en relación con los objetivos de la investigación.

Se adaptaron las matrices del “mapeo de criterios de áreas regulatorias según las facultades regulatorias” del enfoque WASHREG, que abarca las tres facultades regulatorias: i) definición de reglas y aprobación de normas, ii) monitoreo e información y iii) aplicación de normas. Estas matrices se aplicaron para cada una de las áreas regulatorias definidas anteriormente (calidad del servicio, protección al consumidor, establecimiento de tarifas, medio ambiente y salud pública); y se desarrolló un formato de entrevistas estructuradas con tres partes: 1) generalidades del entrevistado y de la institución en la que labora, 2) identificación de brechas aplicando una matriz por cada área regulatoria y cada facultad, y 3) preguntas abiertas sobre las oportunidades de mejora para cada área regulatoria [12] (Figura 1).

Sección I. Introducción				
Objetivo				
Confidencialidad				
Explicación de la estructura de la entrevista				
Sección II. Identificación de brechas				
Identificación de brechas en la regulación nacional y dificultades que tiene la prestación de servicios de agua y saneamiento, por cada área regulatoria y facultad.				
Facultades	Criterios	D: Deficiente	R: Realizado	NR: No Realizado
Definición de reglas y aprobación de normas	Varios			
Monitoreo e información	Varios			
Aplicación de las normas	Varios			
Nota: Una Matriz por cada área regulatoria				
Sección III. Oportunidades de mejora				
Identificación de áreas de mejora en la regulación del sector agua potable y saneamiento, por cada área regulatoria.				

Figura 1. Formato de las entrevistas estructuradas.

Nota. Se debe elaborar una matriz independiente para cada área regulatoria analizada.

Fase III: Análisis y evaluación de resultados

En esta fase se realizó un análisis cualitativo de la información recopilada, evaluando los niveles de efectividad y las brechas regulatorias en función de las tres facultades regulatorias del enfoque WASHREG. Este análisis se aplicó a cada una de las áreas regulatorias definidas, incluyendo la calidad del servicio, la protección al consumidor, el establecimiento de tarifas, los criterios ambientales y la salud pública. Los resultados obtenidos permitieron validar y

complementar el análisis preliminar desarrollado en la fase I, así como identificar oportunidades de mejora en el marco regulatorio del sector, proponiendo lineamientos orientados al fortalecimiento de la gestión y gobernanza del agua en el Ecuador.

3. RESULTADOS

3.1. Identificación de contextos regulatorios

3.1.1 Análisis de escenarios para la implementación WASHREG

El primer paso del enfoque WASHREG es identificar en cuál de los siguientes 4 escenarios se encuentra el sector de agua y saneamiento:

a) Escenario 1.- Sin organismo regulador, sin función reguladora

La ausencia del organismo regulador y las acciones reguladoras, se prestan para que las funciones regulatorias se realicen de manera voluntaria y sin control en la rendición de cuentas, por lo tanto, el enfoque WASHREG podría usarse para diagnosticar la formalización de las funciones regulatorias y ruta para la creación de un nuevo organismo regulador [12].

b) Escenario 2.- Existe el organismo regulador y está dispuesto a mejorar

El desempeño del órgano regulador de manera consistente resulta una tarea delicada, ya que este organismo debe ser imparcial para cumplir con los requisitos de autonomía institucional y política y poseer una sólida capacidad financiera y humana. En algunos casos resulta que las instituciones reguladoras con un mandato deficiente no cumplen en la práctica las tareas de regulación han llevado a importantes lagunas en los mandatos dando lugar a que los servicios para un grupo de población queden fuera de las regulaciones como por ejemplo el suministro de agua y saneamiento in situ en el ámbito rural y de pequeñas comunidades. Entonces, el enfoque WASHREG puede ayudar a los gobiernos a fortalecer a los organismos reguladores existentes, mediante el diagnóstico de las limitaciones relacionadas con la capacidad, las operaciones y las instituciones en el desempeño de las compensaciones adecuadas [12].

c) Escenario 3.- Entidades existentes que realizan funciones sin un mandato claro

Es necesario que las instituciones reguladoras estén bien definidas para que no haya conflicto de mandato, sin una clara separación de estas instituciones resulta que las brechas en el desempeño se reflejan a menudo en un rendimiento deficiente de los servicios de agua y saneamiento, y en bajos niveles de satisfacción de los consumidores. Además, para que no haya dudas en los agentes reguladores sobre la rendición de cuentas, el enfoque WASHREG podría ayudar al gobierno a armonizar y optimizar sus funciones reguladoras en una misma sede institucional [12].

d) Escenario 4.- Fragmentación del sector

Las funciones reguladoras se llevan a cabo sin mucha coordinación entre los distintos subsectores o zonas geográficas lo cual da lugar a que las zonas rurales queden abandonadas o que algunas zonas del país sean excluidas de las regulaciones de los servicios de agua y saneamiento. Por lo tanto, el enfoque WASHREG podría aplicarse en diferentes niveles de gobernanza o subsectores que permitan identificar un enfoque más coordinado permitiendo una regulación de servicio de agua y saneamiento en su totalidad. Además, el enfoque WASHREG puede ayudar a reforzar la coordinación nacional en materia de regulación, independientemente de cuál sea el número de instituciones que desempeñan mandatos regulatorios o del número de subsectores reguladores distintos que existan [12].

Con estas definiciones, se determina que Ecuador se encuentra en el escenario 2, ya que existe un organismo regulador que es la Agencia de Regulación y Control del Agua ARCA, dispuesto a mejorar, ya que se encuentra alineado a los compromisos de la Agenda 2030 y los Objetivos de

Desarrollo Sostenible. La ARCA tiene un rol clave en garantizar el acceso equitativo y sostenible al agua potable enmarcado en el ODS 6. Sin embargo, en las regulaciones emitidas por la ARCA en el contexto del agua potable y saneamiento se pueden encontrar algunas lagunas en los mandatos, como por ejemplo el suministro de agua y saneamiento en el ámbito rural, debido a que Ecuador no cuenta con regulaciones específicas para el área rural. En este sentido el enfoque WASHREG puede ser una buena herramienta para fortalecer a los organismos reguladores existentes mediante el diagnóstico de limitaciones y brechas.

3.1.2 Contexto regulatorio del país

En 2008, la Constitución de la República del Ecuador (CRE) en el artículo 318 estableció que el Estado, a través de la Autoridad Única del Agua (AUA), será el responsable directo de la planificación y gestión de los recursos hídricos que se destinan a consumo humano [13]. Además, mediante Decreto 1088, se crea la SENAGUA como la entidad responsable directa de la planificación y gestión de los recursos hídricos [14].

En Ecuador la CRE en su artículo 12 establece que: el derecho humano al agua es fundamental e irrenunciable. El agua constituye patrimonio nacional estratégico de uso público, inalienable, imprescriptible, inembargable y esencial para la vida. Además, en el artículo 52 señala que: las personas tienen derecho a disponer de bienes y servicio de óptima calidad y a elegirlos con libertad, así como a una información precisa y no engañosa sobre su contenido y características [13].

En 2014, la Ley Orgánica de Recursos Hídricos Usos y Aprovechamientos del Agua (LORHUyA), en el artículo 21 establece que la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), ejercerá la regulación y control de: iii) calidad de los servicios públicos relacionados al sector agua. La LORHUyA en sus artículos 37 y 38 establece que se considerarán servicios públicos básicos relacionados al agua: i) servicio de agua potable y saneamiento [15].

Mediante Decreto Ejecutivo 310, en el año 2014, se crea la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA) como un organismo de derecho público, de carácter técnico-administrativo, adscrito a la SENAGUA, con personería jurídica, autonomía administrativa y financiera, con patrimonio propio y jurisdicción nacional en Ecuador [16]. Algunas de las competencias que tiene esta entidad son:

- Dictar, establecer y controlar el cumplimiento de las normas técnicas sectoriales y parámetro para regular el nivel técnico de la gestión del agua, de conformidad con las políticas nacionales.
- Recopilar, procesar, administrar y gestionar la información hídrica de carácter técnico y administrativo.
- Regular para estandarizar y optimizar sistemas relacionados a los servicios públicos vinculados al agua.
- Regular y controlar la aplicación de criterios técnicos y actuariales para la fijación de las tarifas para los usos y aprovechamiento productivo del agua por parte de la AUA y para la prestación de servicios vinculados al agua.
- Controlar y sancionar el incumplimiento de las regulaciones nacionales, de acuerdo con procesos técnicos diseñados para el efecto e informar a las autoridades competentes de incumplimiento de la normativa.
- Medidas de control de las actividades que alteren la calidad y cantidad del agua.
- Establecer el criterio técnico para la fijación de tarifas de servicio de riego.
- Establecer el criterio técnico para la reducción de pérdida de agua potable.

- Determinar los lineamientos para el control y uso eficiente del agua.
- Evaluación y diagnóstico de los prestadores de servicios público de agua y saneamiento.

En el año 2020, mediante Decreto Ejecutivo N° 1007, se determina la fusión de la SENAGUA y Ministerio de Ambiente, quedando la competencia de la SENAGUA bajo el viceministerio de agua dentro del Ministerio del Ambiente y Agua [17].

Mediante Decreto N° 94, se determina la fusión por absorción entre el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica y el Ministerio de Energía y Minas, dando como resultado el Ministerio de Ambiente y Energía, en el cual todas las atribuciones, funciones y representaciones del MAATE son asumidas por el nuevo ministerio. Entonces la competencia se queda en el área de viceministerio del Agua [18].

3.1.3 Análisis preliminar de responsabilidades regulatorias y su efectividad

Desde el año 2016, ARCA ha establecido 13 regulaciones, de las cuales 6 son en el ámbito del servicio de agua y saneamiento, 2 en el ámbito del servicio de riego y 5 en el ámbito de la gestión de los recursos hídricos. En la Tabla 3, se presentan las regulaciones identificadas del sector agua y saneamiento por área regulatoria:

Tabla 3. Regulaciones del sector agua potable y saneamiento por áreas regulatorias.

Áreas regulatorias	Regulaciones emitidas por ARCA
Regulación de la calidad del servicio	REG-003-2016 [19]
Protección al consumidor	REG-007-2017 [20]
Establecimiento de tarifas	REG-006-2017 [21]
Competencia	Para el caso de Ecuador no aplica el área regulatoria "Competencia", ya que en Ecuador la prestación del servicio de agua potable y saneamiento es público o comunitario
Medio ambiente	REG-014-2025 [22]
Salud pública	REG-012-2022 [23]

Nota. La regulación REG-014-2025 [22] corresponde a la normativa más reciente emitida por la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA) al momento del análisis. Se verifica su vigencia para el año 2026; en caso de encontrarse en proceso de implementación o actualización, su análisis se considera de carácter referencial dentro del presente estudio.

Las regulaciones que ARCA emite para el sector de agua y saneamiento deben ser implementadas por los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales GADM que tienen la competencia exclusiva en la prestación del servicio de agua y saneamiento (Art 264 del COOTAD) [24]. Cabe indicar que los GADMs pueden ejercer esta competencia de manera directa (con un Departamento o Unidad dentro del GADM, o a través de una empresa pública), adicional en Ecuador tenemos prestadores comunitarios como las Juntas de Agua que brindan el servicio de agua y saneamiento en áreas rurales. Por ello, ARCA en algunas regulaciones realiza diferenciación de reglas para prestadores públicos (GADM y empresas públicas) y prestadores comunitarios. Adicionalmente, ARCA realiza un plan de visitas a los prestadores para el control de la aplicación de las regulaciones emitidas. Para el análisis de las distintas responsabilidades regulatorias y la efectividad percibida, se ha realizado la siguiente matriz (Tabla 4) con base en el análisis de información secundaria disponible, que luego será validadas y complementadas con los resultados de las entrevistas realizadas a expertos en el tema.

Tabla 4. Matriz de cumplimiento de las regulaciones.

Acciones y áreas regulatorias por subsector (urbano/urbano, nacional/subnacional)		Calidad del servicio			Protección al consumidor			Establecimiento de tarifas			Medio ambiente			Salud pública		
		La regulación implica una normativa para control a la calidad del servicio de agua potable y saneamiento.			La regulación implica la resolución de quejas de los consumidores por parte de los operadores de servicios.			Implica una normativa para el establecimiento de tarifas en la prestación de servicios a un costo asequible por parte de los prestadores de servicios públicos.			Implica reglas sobre la extracción del agua y la gestión de aguas residuales, lodos fecales y efluentes en la cadena de saneamiento, con el fin de proteger el medio ambiente.			Implica una normativa para el establecimiento de técnicas de evaluación y diagnóstico de los estándares sanitarios para garantizar la seguridad del agua potable y saneamiento.		
En general, ¿cuál es el nivel de eficiencia de las regulaciones percibidas en esta área?		B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A
B: Bajo, M: Medio, A: Alto																
1. Definir nuevas reglas	¿Existe alguna institución encargada de hacerlo o se hace sin un mandato legal? SÍ/NO Si es sí, ¿quién?	Si existe y el ente encargado es la ARCA con la regulación REG-003-2016 reformada “Normativa técnica para la evaluación y diagnóstico de la prestación de los servicios públicos de agua potable y/o saneamiento en las			Si existe una ley que es la Ley Orgánica de Defensa al Consumidor que se complementa con la regulación REG-007-2017 [20] “Normativa para el establecimiento de contratos en la prestación de los servicios públicos de agua potable y/o			Si existe y el ente encargado es la ARCA con la regulación REG-006-2017 [21].			Si existe y el ente encargado es la ARCA con la regulación REG-014-2025 [22].			Si existe y el ente encargado es la ARCA con la regulación REG-012-2022 [23].		

		áreas urbanas y rurales en el territorio ecuatoriano”, que define estándares técnicos para la prestación del servicio y se complementa con la regulación [25].	saneamiento” que incluye obligación de los prestadores de entregar información veraz, completa de los servicios contratados y respetar los derechos de los consumidores.			
	Comentarios					
2. Monitorear e informar	¿Existe alguna institución encargada de hacerlo o se hace sin un mandato legal? SÍ/NO Si es sí, ¿quién?	La ARCA realizará el control a las obligaciones vertidas en la REG-003-2016 [19] (Art. 25 de la regulación) Los resultados de la evaluación de la prestación del servicio realizada por la ARCA serán notificados al prestador público, deberán ser de libre acceso y publicados por los medios que la ARCA determine (Art.21 de la regulación)	La ARCA dentro del proceso de evaluación de la prestación controlará el cumplimiento de la REG-007-2017 (Art. 22) [20]. El prestador deberá informar el número de cuentas asignadas a los consumidores mediante un contrato (Art. 21) [20].	ARCA será responsable del control a los prestadores de servicios en la aplicación de la REG-006-2017 [21] y podrá solicitar toda la información necesaria para el control a la fijación de tarifas. (Art. 55 y 56 de la regulación) [21].	La ARCA realizará el control a las obligaciones constantes en la regulación REG-014-2025 (Art. 19) [22]. El prestador público debe brindar las facilidades para ejecutar los controles que permitan verificar el cumplimiento de la norma técnica (Art. 20) [22].	Los prestadores del servicio de agua potable reportarán la información de los resultados del análisis de los parámetros de control a la calidad de agua (Art.20) [23]. La ARCA realizará el control a lo establecido en la presente norma técnica (Art.21) [23]. El prestador tiene entre sus responsabilidades entregar la información solicitada por la ARCA en relación con el uso y gestión de los lodos (Art. 8) [23].
	Comentarios					

3. Hacer cumplir las reglas existentes	¿Existe alguna institución encargada de hacerlo o se hace sin un mandato legal? SÍ/NO Sí es sí, ¿quién?	ARCA, según Art. 21 de el proceso de control a la norma técnica [19]. Reformada (que incluye proceso administrativo sancionatorio)	ARCA, según el capítulo V proceso sancionatorio, contenido en la [20].	ARCA, según el capítulo II Régimen sancionatorio, contenido en la [21]	ARCA, según el capítulo VI Proceso de control e incumplimiento y capítulo VII Régimen sancionatorio, contenido en la [22].	ARCA, según el capítulo V Control al cumplimiento de la norma técnica y capítulo VI Régimen sancionatorio, contenido en la [23].
Comentarios						

Nota. La información presentada pertenece a las acciones regulatorias de definición, monitoreo y cumplimiento; aplicadas a las áreas de calidad del servicio, protección al consumidor, establecimiento de tarifas, medio ambiente y salud pública, en el marco de las regulaciones emitidas por la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA) del Ecuador. El nivel de eficiencia percibido se clasifica en B (bajo), M (medio) y A (alto).

3.2 Levantamiento de información

Los resultados del levantamiento de información, a través de entrevistas a expertos, validaron y profundizaron las brechas identificadas en el análisis documental. En el área de calidad del servicio, los entrevistados coincidieron en que, si bien existen normas claras, el monitoreo es débil y desigual, particularmente en zonas rurales, y la difusión de resultados es casi nula. En protección al consumidor, se identificó como principal brecha la baja socialización de los mecanismos de reclamo y la limitada aplicación de sanciones. Para el establecimiento de tarifas, persiste una escasa participación de los usuarios en su definición. Finalmente, en las áreas de medio ambiente y salud pública, los expertos señalaron una falta crítica de articulación interinstitucional y de vigilancia sanitaria, lo que deriva en un cumplimiento parcial de las regulaciones existentes.

3.3 Validación de las brechas identificadas en el contexto regulatorio del país

Para validar las brechas previamente identificadas en el marco normativo, se analizaron de manera conjunta las cinco entrevistas estructuradas aplicadas a los expertos. A partir de este análisis se elaboró una síntesis de los principales hallazgos por cada área regulatoria, distinguiendo fortalezas percibidas, debilidades recurrentes y oportunidades de mejora. Estos resultados se presentan de forma resumida en la Tabla 5.

La Tabla 5 muestra que las brechas identificadas no responden solo a percepciones individuales de los entrevistados, sino que reproducen patrones ya documentados en la evidencia nacional: persistencia de desigualdades territoriales en cobertura y calidad del servicio [1], [2], dificultades de gestión y participación social en contextos rurales y semirurales [6], y elevados costos sanitarios y económicos asociados a servicios inadecuados de agua y saneamiento [7], [9]. Varios de los indicadores reportados por los prestadores se sitúan en rangos similares a los observados en los ejercicios de benchmarking y evaluación sectorial realizados por la ARCA [10], [12], respaldando la validez de las brechas regulatorias identificadas mediante el enfoque WASHREG.

De acuerdo con las entrevistas realizadas en lo que respecta a la calidad del servicio, los entrevistados coinciden en que existen normas claras como la [19], reformada “Normativa técnica para la evaluación y diagnóstico de la prestación de los servicios públicos de agua potable y/o saneamiento en las áreas urbanas y rurales en el territorio ecuatoriano”, que define estándares técnicos para la prestación del servicio y se complementa con la regulación [25] “Norma técnica para el control de la gestión del uso eficiente del agua de consumo humano”. Sin embargo, se consideran que el monitoreo aún es débil y no se realiza con regularidad, principalmente en zonas rurales [11]. Adicional, los entrevistados concuerdan en que la aplicación de la norma es buena y que la implementación se ha realizado, pero existen ciertos puntos donde se debe poner mayor énfasis, como: i) la difusión de información sobre la calidad de servicio hacia los consumidores, ya que las buenas prácticas e informes de desempeño no se ven publicadas periódicamente, y; ii) la fiabilidad de los datos reportados por los operadores del servicio. Sin embargo, esta área solo necesitaría un mayor control en la divulgación de la información.

En referencia a la protección del consumidor no existe una regulación en específico que abarque esta área, pero se sustenta en cierto modo con la “Normativa para el establecimiento de contratos en la prestación de los servicios públicos de agua potable y/o saneamiento” [20], que define las condiciones y procedimientos para formalizar la prestación de servicios públicos de agua potable y saneamiento mediante contratos entre prestadores y consumidores. Esta norma incluye cláusulas sobre la calidad del servicio, tarifas, derechos del consumidor y mecanismos de reclamo; además, se exige que los contratos sean claros, accesibles y estén alineados con la Ley Orgánica de Defensa del Consumidor. Estos aspectos se complementan con la Ley Orgánica de Defensa del Consumidor, que en el artículo 1 y 2 menciona que reconoce al consumidor como sujeto de derecho frente a proveedores de bienes y servicios. Así, los entrevistados consideran

que el sistema de atención para reclamos es limitado y esto podría implicar que no se estén garantizando los derechos de los consumidores de una forma plena.

Tabla 5. Síntesis de resultados de las entrevistas estructuradas por área regulatoria.

Área regulatoria	Fortalezas percibidas	Principales brechas y oportunidades de mejora
Calidad del servicio	Existencia de normas técnicas claras para la prestación del servicio y para la evaluación de los prestadores.	Monitoreo poco frecuente y desigual; uso limitado de los resultados para corregir la gestión; necesidad de evaluaciones más seguidas y controles permanentes.
Protección al consumidor	Definición básica de derechos y deberes; presencia de procedimientos formales de reclamos.	Baja socialización de los mecanismos de reclamo; tiempos prolongados de respuesta; aplicación limitada de sanciones; necesidad de campañas de información a la población.
Establecimiento de tarifas	Procedimientos regulados para la aprobación y ajuste de estructuras tarifarias.	Escasa participación de usuarios en la discusión tarifaria; falta de claridad sobre criterios de cálculo y sobre la situación económica de los prestadores; necesidad de mesas de trabajo con usuarios.
Criterios medioambientales	Normativa específica para extracción de agua, vertidos y gestión de lodos; coordinación con autoridades ambientales.	Inspecciones ambientales insuficientes; registros incompletos de vertidos; debilidades en la aplicación de sanciones; demanda de estudios periódicos sobre impactos y vertidos.
Calidad del agua potable vinculada a salud pública	Parámetros de calidad del agua definidos; obligaciones de vigilancia sanitaria para prestadores y autoridades de salud.	Sistemas de alerta temprana incipientes; difusión limitada y poco accesible de resultados de calidad del agua; necesidad de monitoreos y publicaciones continuas para la ciudadanía.

En cuanto al establecimiento de tarifas, se cuenta con la regulación “Normativa técnica para el establecimiento de criterios técnicos y actuariales para la determinación de costos sostenibles en la prestación de los servicios de agua potable y saneamiento, para la fijación de tarifas por los prestadores públicos de estos servicios” [21] y la implementación de esta se ha realizado en su totalidad. Según los entrevistados, persisten ciertas debilidades las cuales se deben reforzar, tales como: i) la inclusión de los consumidores en la fijación de tarifas, ii) la existencia de información económica de los prestadores de servicio hacia el público y iii) que el control de tarifas establecidas sea de acuerdo con los gastos reales de los operadores. Por lo tanto, esta área se considera que tiene un buen avance, con posibles mejoras en las evaluaciones a los prestadores de servicio las cuales se deben realizar con más frecuencia.

Sobre las regulaciones relacionadas al medio ambiente, existe la regulación “Criterios técnicos para el uso de los lodos generados en las plantas de tratamiento del agua para efectos de control” [22], estableciendo el marco técnico-ambiental para la gestión de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), priorizando el manejo, tratamiento, aprovechamiento y disposición final. A pesar de existir esta regulación, los entrevistados coinciden en la inexistencia de procesos de socialización y capacitación para los prestadores de servicio, por lo que hay desconocimiento de las regulaciones emitidas, además se encuentran

vacíos de información. Los entrevistados recalcan que: i) en los marcos regulatorios no están claros los mecanismos de seguimiento y control dentro de la gestión de aguas residuales, lodos fecales y efluentes en la cadena de saneamiento, ii) el ARCA, los GADs y otras entidades no tienen buena articulación para la aplicación efectiva de las regulaciones, ii) los resultados de monitoreos no son publicados por lo que la población no tiene acceso. Dentro de este parámetro sugieren la reformulación de los ejes logísticos de comunicación por parte del ente regulador, además, que exista mayor control y supervisión del manejo adecuado de los servicios de saneamiento, debido a que se evidencia un total abandono en la gestión de las PTAR, conllevando a diversos problemas, entre ellos las descargas de aguas residuales, sin un tratamiento adecuado, en fuentes hídricas cercanas.

Finalmente, para el área regulatoria salud pública, se tiene la regulación "Norma técnica para el control a la calidad del agua de consumo humano" [23] donde se establece los criterios técnicos para realizar el control de la calidad del agua destinada para el consumo humano. Además, existe la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108 en la que se determinan los requisitos que debe cumplir el agua potable para que se pueda destinar al consumo humano. Los entrevistados concluyen que los aspectos más críticos de la regulación que se deben abarcar son: i) información clara sobre los riesgos en la calidad de agua, ii) sanciones por parte del órgano regulador, iii) reparación de daños a la población e inspecciones periódicas para supervisar la seguridad del agua potable, iv) incorporar especificaciones técnicas para el diseño, construcción y mantenimiento de los sistemas de saneamiento.

En conclusión, según los entrevistados hay diferentes tipos de enfoque mismos que van desde la participación activa y efectiva de la ciudadanía, reforzar el marco regulatorio en el que claramente se establezcan los mecanismos de control y seguimiento, monitoreos y publicación permanente de los resultados y capacitación a los prestadores de servicio. Sin embargo, en lo que coincidieron los entrevistados es que no existe el control suficiente para que se cumpla con los reglamentos emitidos por la ARCA, además la articulación entre las instituciones es deficiente y existe muy poca comunicación. También expresaron que las sanciones a los prestadores de servicios deberían ser más estrictas para que tomen conciencia ya que el servicio de agua potable para consumo humano es vital importancia para la sociedad.

3.4 Cuellos de botella en la regulación

En síntesis, los cuellos de botella principales son: deficiente capacidad de monitoreo, limitado control y aplicación de sanciones a los prestadores de servicio, lo que genera que el cumplimiento de las regulaciones sea parcial o deficiente. A continuación, en la Tabla 6 se muestra los cuellos de botella por área regulatoria.

Tabla 6. Cuello de botella por áreas.

Áreas regulatorias	Cuello de botella
Calidad del servicio	Deficiente de monitoreo y poca difusión de información sobre la calidad de servicio hacia los consumidores.
Protección al consumidor	Baja inclusión del consumidor en los procesos regulatorios.
Establecimiento de tarifas	Debilidad en el control de aplicación de tarifas.
Criterios medioambientales	Falta de articulación interinstitucional y de transparencia ambiental.
Salud pública	Baja vigilancia sanitaria y mecanismos de prevención poco operativos.

Nota. Los cuellos de botella identificados corresponden a limitaciones en la gestión regulatoria del sector de agua potable y saneamiento, que afectan la eficiencia, transparencia y calidad en la prestación de los servicios.

En el ámbito rural, donde predominan los prestadores comunitarios como las Juntas de Agua, las limitaciones en el monitoreo responden principalmente a la falta de capacidad técnica, recursos financieros y acompañamiento institucional. En este sentido, se propone que la ARCA implemente un modelo de regulación descentralizada, basada en:

- i. Esquemas de monitoreo comunitario.
- ii. Capacitación técnica continua, y
- iii. La creación de unidades territoriales de control.

Con este enfoque se permitirá mejorar la aplicación de las regulaciones, considerando las particularidades organizativas y económicas de los sistemas comunitarios.

3.5 Propuesta de mejora

Algunas de las propuestas expuestas por los entrevistados se presentan en la Tabla 7 en la que se realiza un resumen para cada una de las áreas regulatorias.

Tabla 7. Resumen de propuestas de mejora.

Áreas regulatorias	Propuestas de mejora
En calidad del servicio	- Reforzar mecanismos de control de la aplicación de las regulaciones. - Evaluación del servicio en la que se incluyan la percepción de los consumidores. - Evaluaciones constantes por parte del organismo de control. - Capacitación a los GADM y definir estándares.
En establecimiento de tarifas	- Reforzar el marco regulatorio para que queden claros los mecanismos de seguimiento y control. - Sensibilización a la población sobre los objetivos de las tarifas, aplicación y beneficios para el servicio.
En protección del consumidor	- Elaborar una regulación específica para garantizar los derechos del consumidor y evaluar con indicadores los sistemas de atención para reclamos.
En criterios medioambientales	- Reforzar el marco regulatorio para que queden claro los mecanismos de seguimiento y control en la gestión de aguas residuales, lodos fecales y efluentes dentro de la cadena de saneamiento. - Mejorar las capacidades de los operadores y técnicos en el manejo adecuado de la PTAR. - Incorporar comités con participación ciudadana, GAD y el estado sobre los beneficios de mecanismos financieros para la protección de las fuentes hídricas.
En calidad del agua potable relacionada a la salud pública	- Monitoreos periódicos e información a la población. - Controles permanentes. - Resultados de monitoreos publicados constantemente para que la población tenga acceso a la información.

Nota. Las propuestas de mejora se orientan a fortalecer la eficiencia, transparencia y sostenibilidad de la regulación en el sector de agua potable y saneamiento, considerando aspectos técnicos, institucionales y de participación ciudadana.

4. DISCUSIÓN

Al aplicar el enfoque WASHREG al caso ecuatoriano se confirma la coexistencia de un marco jurídico relativamente robusto y brechas persistentes en su implementación. Estudios recientes sobre el derecho humano al agua en el país señalan la misma tensión entre avances normativos y dificultades para traducirlos en garantías efectivas para toda la población, especialmente en contextos vulnerables [26]. De este modo, los resultados del estudio refuerzan la idea de que la problemática es menos normativa y más de gobernanza regulatoria. Este resultado es consistente con los análisis nacionales de cobertura y continuidad del servicio, que muestran avances en acceso, pero rezagos en control de agua no contabilizada y en confiabilidad de los datos reportados por los prestadores [27].

En lo que respecta a la calidad del servicio, [19] establece un buen marco técnico; sin embargo, la capacidad para monitoreos es insuficiente. Además, la difusión de los informes es casi nula y existe poca confianza en los datos reportados. Este contexto empeora en el caso de la protección al consumidor, donde los mecanismos de queja y participación ciudadana siguen siendo limitados, ya que no existe una regulación específica, sólo se cuenta con la Ley de Defensa del Consumidor y la [20] sobre los contratos que deben suscribir los operadores con los usuarios por lo que no se estaría garantizando efectivamente los derechos de los usuarios, sobre todo en áreas rurales. También, existen estudios sobre el derecho humano al agua en Ecuador que apuntan a la misma brecha entre reconocimiento normativo y posibilidades reales de reclamo y participación informada, especialmente en comunidades rurales y periurbanas [27].

Los criterios técnicos para establecer tarifas han avanzado, como se puede evidenciar en el [21]; sin embargo, se sigue percibiendo la limitada participación por parte de los usuarios. En los sectores de medio ambiente y salud pública, los avances en la normativa [22] y [23] son importantes, pero su aplicación es limitada, debido a la falta de socialización, así como una falta de control adecuado a los procesos de saneamiento. Investigaciones con enfoque hidro social documentan que estas debilidades en tratamiento de aguas residuales y manejo de lodos se relacionan con riesgos sanitarios persistentes y con conflictos por el uso del agua en territorios andinos [28].

Estas limitaciones se pueden ver reflejadas en indicadores como: cobertura de agua potable del 77,60 % y cobertura de saneamiento del 58,06 %, calidad de agua 96,89 %, continuidad de agua potable 91,21 %, costo unitario del metro cúbico de agua potable \$1,28, agua no contabilizada 44,85 % y eficiencia para solucionar quejas y reclamos 91,36 % [16]. Al compararlos con los valores reportados en ejercicios de seguimiento al ODS 6 y en estudios recientes sobre gestión del agua en el país, se observa que los patrones de desigualdad y de débil fiscalización identificados en este trabajo son coherentes con la evidencia empírica disponible [28]. Estos hallazgos muestran la demanda urgente de una mejora integral de la gobernanza con un enfoque combinado en monitoreo y control, y no tan sólo la emisión de normativas y regulaciones.

Los hallazgos son consistentes con experiencias en países de la región como Colombia [29] y Perú [30], donde la aplicación de los enfoques similares al WASHREG ha evidenciado que las principales limitaciones no radican en la ausencia de normativa, sino en la capacidad de implementación, monitoreo y control por parte de las instituciones regulatorias. En dichas situaciones, la descentralización de la gestión y el fortalecimiento de capacidades locales han sido estrategias clave para mejorar la efectividad del sistema regulatorio, particularmente en zonas rurales.

En relación con la baja participación ciudadana, se propone la implementación de mecanismos técnicos como: plataformas digitales de reporte ciudadano sobre las fallas en el servicio, sistemas de indicadores de satisfacción del usuario; así como la creación de veedurías ciudadanas locales que participen en los procesos de monitoreo y evaluación del servicio. Con estas herramientas se

permitirá fortalecer la transparencia, mejorar la rendición de cuentas y generar información complementaria para la toma de decisiones regulatorias.

En este sentido, el principal problema identificado no radica en la ausencia de normativa, sino en una debilidad estructural en la gobernanza regulatoria, caracterizada por limitaciones en la coordinación institucional, la capacidad de monitoreo y la aplicación efectiva de las sanciones. Con estos hallazgos se refuerza la necesidad de transitar desde un enfoque centrado en la generación de normativa hacia un modelo orientado a la implementación efectiva, con énfasis en mecanismos de control, participación ciudadana y fortalecimiento institucional.

5. CONCLUSIONES

El análisis realizado en la investigación evidencia que el principal desafío del sector de agua potable y saneamiento en el Ecuador no radica en la ausencia de normativa, sino en las limitaciones de la gobernanza regulatoria, particularmente en las funciones de monitoreo, control y aplicación de sanciones. Por ende, el enfoque WASHREG se consolida como una herramienta útil no solo para el diagnóstico de brechas, sino también para estructurar procesos de fortalecimiento institucional orientados a la mejora de la efectividad regulatoria.

El país dispone de regulaciones específicas en calidad del servicio [19], protección al consumidor [20], establecimiento de tarifas [21], medio ambiente [22] y salud pública [23]. No obstante, su efectividad se ve limitada por capacidades insuficientes de monitoreo, control y sanción, especialmente en prestadores rurales y comunitarios.

La triangulación entre análisis documental y entrevistas mostró patrones recurrentes de débil protección al consumidor, limitada transparencia de la información y participación ciudadana, así como vacíos en la incorporación de indicadores de salud y ambiente en la evaluación del desempeño de los prestadores.

El estudio aporta al campo de la regulación del agua en Ecuador al ofrecer una lectura integrada de marco normativo, desempeño e institucionalidad, que permite priorizar líneas de fortalecimiento de la gobernanza regulatoria y sirve como referencia para futuras aplicaciones de WASHREG en otros contextos de la región andina.

La aplicación del enfoque WASHREG en el Ecuador requiere una adaptación contextual que considere la diversidad territorial, la heterogeneidad de los modelos de gestión y las limitaciones institucionales existentes; su incorporación como herramienta sistemática dentro del proceso de regulación permitiría transitar desde un enfoque normativo hacia un modelo de gobernanza basado en resultados, fortaleciendo así la sostenibilidad, equidad y eficiencia en la prestación de los servicios de agua potable y saneamiento.

En función a los hallazgos, se plantea las siguientes recomendaciones operativas, para la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA) la implementación de un sistema de monitoreo descentralizado con unidades territoriales de control, priorizando zonas rurales, fortalecimiento de los mecanismos de control y sanción mediante procesos ágiles y efectivos. Para los GADM y prestadores comunitarios, se sugiere mejorar la gestión técnica y operativa mediante los programas de capacitación, e implementar sistemas de reporte de información estandarizados.

REFERENCIAS

- [1] M. Pozo, J. C. Serrano, R. Castillo y L. Moreno, *Indicadores ODS de agua, saneamiento e higiene en Ecuador*, Estud. Temáticos - INEC, Grupo del Bnaco Mundial, pp. 1–27, 2016. [En línea]. Disponible en: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Bibliotecas/Libros/Diagnostico_ASH_pobreza_INEC_BM.pdf

- [2] C. V. Cedeño Castillo y Z. I. Esteves Fajardo, “El acceso al agua en Ecuador: Impacto y posibles soluciones”, *Cienciamatria*, vol. 9, no. 1, pp. 496–507, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9297289>
- [3] Organización Mundial de la Salud (OMS) y UNICEF. (2017). *"Progress on drinking-water, sanitation and hygiene: 2017 update and SDG baselines"* Ginebra, Suiza. [En línea]. Disponible en: <https://fctc.who.int/resources/publications/i/item/9789241512893>
- [4] Presidencia de la República, “*Reglamento Ley Recursos Hídricos Usos y Aprovechamiento del Agua*”, Registro Oficial No. 483, no. 740, pp. 1–45, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/03/Reglamento-a-la-LORHUyA.pdf>
- [5] *Guía De Agua Segura*. Ministerio de Salud Pública - Subsecretaría Nacional de Promoción de la Salud e Igualdad - Dirección Nacional de Ambiente y Salud, Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) - Gerencia de Operaciones, Quito, Ecuador, 2019, pp. 72. [En línea]. Disponible en: <https://www.salud.gob.ec/wp-content/uploads/2020/12/Guia-Agua-Segura.pdf>
- [6] X. J. Bravo Coello, C. M. García Moncayo y M. A. Guerra Moscoso, “Assessment of WASH barriers in semi-rural Andean communities - Pilot study”, *ACI. Avances en Ciencias e Ingenierías*, vol. 15, no. 2, pp. 1-20, dic. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9243915>
- [7] A. Molina-Vera, M. Pozo y J. Serrano, “*Agua, saneamiento e higiene: Medición de los ODS en Ecuador*”. Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) y Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF), pp. 5-9, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.unicef.org/ecuador/informes/agua-saneamiento-e-higiene>
- [8] Presidencia de la República, “*Reglamento a la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua*”, Registro Oficial Suplemento No. 483, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.ec/regulaciones/reglamento-ley-recursos-hidricos-usos-aprovechamiento-agua>
- [9] M. E. Acosta, M. Basani y H. Solís, “*Prácticas y saberes en la gestión comunitaria del agua para consumo humano y saneamiento en las zonas rurales de Ecuador*”, Banco Interamericano de Desarrollo, 2019, pp. 109. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.18235/0002022>
- [10] D. Espés-Pizarro, “*Ecuador, un mercado con alto potencial para las empresas españolas de agua y saneamiento*”, ICEX España Export. e Inversiones, pp. 28, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.iagua.es/noticias/icex-espana-exportacion-e-inversiones/ecuador-mercado-alto-potencial-empresas-espanolas>
- [11] Agencia de regulación y control, “*Benchmarking de prestadores públicos de los servicios de agua potable y saneamiento en el Ecuador*”, Agencia de Regulación y Control de Agua, pp. 1–10, 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/12/Boletin-Estadistico-APS_dic23-fnl.pdf
- [12] SIWI, “*The WASHREG Approach: An Overview*”. Estocolmo y Nueva York, pp. 2–34, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.unicef.org/reports/washreg-approach>
- [13] Presidencia de la República, “*Constitución de la República del Ecuador*”, Registro Oficial No. 449, 2008. [En línea]. Disponible en: https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/02/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador_act_ene-2021.pdf
- [14] Presidencia de la República. “*Decreto Ejecutivo 1088*”, Registro Oficial No. 346, 2008. [En

- línea]. Disponible en: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ecu79866.pdf>
- [15] Presidencia de la República, "*Ley Orgánica de Recursos Hídricos Usos y Aprovechamiento del Agua*", Registro Oficial No. 802, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/03/Ley-Org%C3%A1nica-de-Recursos-H%C3%ADricos-Usos-y-Aprovechamiento-del-Agua.pdf>
- [16] Presidencia de la República. "*Decreto Ejecutivo 310*", Registro Oficial Suplemento No. 236, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-10/DECRETO-EJECUTIVO-310-DE-CREACI%C3%93N-DE-LA-EMPRESA-P%C3%9ABLICA-DEL-AGUA.pdf>
- [17] Presidencia de la República. "*Decreto Ejecutivo 1007*". Registro Oficial Suplemento No. 194, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://procuraduria.utpl.edu.ec/NormativaExterna/FUSI%C3%93N%20MINISTERIO%20DEL%20AMBIENTE%20Y%20AGUA.pdf>
- [18] Presidencia de la República. "*Decreto Ejecutivo 94*". Registro Oficial No. 116, 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.primicias.ec/uploads/files/2025/08/15/Decreto_Ejecutivo_94_20250714224344_20250714224349_20250714224351.pdf
- [19] Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), "*Resolución No. DIR-ARCA-003-2016*", Registro Oficial Suplemento No. 774, 2016. [En línea]. Disponible en: https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/09/Res.-DIR-ARCA-003-2016_opt.pdf
- [20] Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), "*Regulación Nro. DIR-ARCA-RG-007-2017*", Registro Oficial No. 127, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/10/Regulaci%C3%B2n-DIR-ARCA-RG-007-2017.pdf>
- [21] Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), "*Regulación Nro. DIR-ARCA-RG-006-2017*", Registro Oficial Suplemento No. 190, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/08/REGULACION-Nro.-DIR-ARCA-RG-006-2017.pdf>
- [22] Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), "*Regulación Nro. DIR-ARCA-RG-014-2025*", Segundo Registro Oficial Suplemento No. 50, 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2025/05/regulacio%CC%81n_dir-arca-rg-014-2025.pdf
- [23] Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), "*Regulación Nro. DIR-ARCA-RG-012-2022*", Registro Oficial No. 40, 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/07/Regulacio%CC%81n-DIR-ARCA-RG-012-2022-Calidad-del-agua_-signed.pdf
- [24] Presidencia de la República. "*Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomías y Descentralización (COOTAD)*", Registro Oficial Suplemento No. 303, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://www.cpcs.gob.ec/wp-content/uploads/2020/01/cootad.pdf>
- [25] Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), "*Regulación Nro. DIR-ARCA-RG-011-2022*". Quito: Registro Oficial No. 40, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/07/Regulacion-DIR-ARCA-RG-011-2022-Uso-Eficiente-del-agua-signed.pdf>

- [26] L. Haro-Terán, "El acceso al agua potable en Ecuador: trascendiendo fronteras hacia la universalidad del derecho humano", *Verdad y Derecho. Revista Arbitrada de Ciencias Jurídicas y Sociales*, vol. 3, no. 1, pp. 16-36, ene. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.62574/nhxa6e22>
- [27] L. Lascano-Demera, "Transformaciones hidrosociales en Picaihua, Tungurahua (Ecuador): un análisis multiescalar desde la ecología política del agua", *Inter disciplina*, vol. 10, no. 28, pp. 507-542, dic. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2022.28.83312>.
- [28] M. Arroyo Arévalo y J. Ramón García, "Proceso de descentralización y el sector agua potable y saneamiento", *Revista Internacional de Administración*, no. 12, pp. 49-72, Jul. 2022. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10644/8780>
- [29] WASH LAC Región de América Latina y el Caribe, "*Clúster/Sector de Agua, Saneamiento e Higiene (WASH) Colombia*", (s.f.). [En línea]. Disponible en: <https://www.washlac.com/esp/mesas-clusters/sudamerica/colombia>.
- [30] OECD, "*Gobernanza del Agua en Perú*", pp. 132-138, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1787/f826f55f-es>.



Diseño de sistemas de frenado y bloqueo mecánico en maquinaria industrial para minimizar riesgos durante tareas de mantenimiento

(Design of Braking and Mechanical Locking Systems in Industrial Machinery to Minimize Risks During Maintenance Tasks)

Luis Fernando Jácome Alarcón, Yuliana Estefania León Quiñonez, Karen Michelle Almeida Rivera, Rubén Calixto Romero Giler
Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador
ljacomea@uteq.edu.ec, yleonq@uteq.edu.ec, kalmeidar@uteq.edu.ec,
rromerog2@uteq.edu.ec

Resumen: El presente estudio tiene como objetivo evaluar el desempeño de sistemas de frenado y bloqueo mecánico aplicados a maquinaria industrial, con el fin de establecer criterios técnicos que contribuyan a la seguridad durante tareas de mantenimiento. Se desarrolló un diseño experimental controlado basado en la medición de variables como tiempo de detención, ángulo residual post-bloqueo y deformación estructural en tres mecanismos: freno de disco, pasador de bloqueo y sistema de trinquete. Los resultados evidenciaron diferencias significativas entre los mecanismos evaluados, destacándose el freno de disco por su eficiencia en tiempos de detención, mientras que el pasador de bloqueo garantizó inmovilización absoluta con mínima deformación estructural. El análisis estadístico confirmó la influencia del tipo de mecanismo sobre el desempeño dinámico y estructural del sistema. El estudio aporta lineamientos técnicos para la selección y diseño de sistemas de frenado y bloqueo en función de las condiciones operativas, contribuyendo a la reducción de riesgos en entornos industriales.

Palabras clave: Deformación, carga mecánica, elasticidad, material estructural, análisis experimental.

Abstract: This study aims to evaluate the performance of braking and mechanical locking systems applied to industrial machinery in order to establish technical criteria that enhance safety during maintenance tasks. A controlled experimental design was implemented, measuring variables such as stopping time, post-lock residual angle, and structural deformation in three mechanisms: disc brake, locking pin, and ratchet system. Results showed significant differences among the evaluated mechanisms. The disc brake demonstrated higher efficiency in stopping time, while the locking pin ensured absolute immobilization with minimal structural deformation. Statistical analysis confirmed the influence of the mechanism type on system performance. This study provides technical guidelines for selecting and designing braking and locking systems according to operational conditions, contributing to risk reduction in industrial environments.

Keywords: Deformation, mechanical load, elasticity, structural material, experimental analysis.

1. INTRODUCCIÓN

La seguridad en las actividades de mantenimiento en maquinaria industrial se encuentra entre los ejes más relevantes de la gestión de riesgos en contexto de producción. A nivel internacional,

los sucesos relacionados con movimientos imprevistos de los elementos de las máquinas mecánicas se encuentran entre las grandes causas de resultados lesivos graves y fatalidades entre el personal encargado del mantenimiento, especialmente en sectores más automatizados y aplicados a las máquinas pesadas.

Los datos que corroboran esta afirmación son los de la *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA), que reporta un porcentaje cercano al 10 % de accidentes fatales en la industria que son consecuencia de fallas en los procedimientos de bloqueo y control de energías peligrosas, lo que indica que se hace necesario emplear sistemas de frenado y de bloqueo que sean seguros y que garanticen que el equipo esté completamente detenido durante las tareas técnicas a realizar [1].

Las normas internacionales, como la ISO 14118:2017 [2], establecen directrices para la prevención de puestas en marcha inesperadas mediante dispositivos de enclavamiento, mecanismos de bloqueo mecánico y sistemas de freno redundantes. Sin embargo, diversos estudios advierten que la sola aplicación de procedimientos administrativos como el lockout/tagout, no es suficiente cuando los equipos presentan inercia elevada, acumulación energética o fallas estructurales en sus componentes de detención [3]. Es por ello que la ingeniería de controles mecánicos de frenado y bloqueo se ha consolidado como una estrategia clave para minimizar el riesgo residual inherente a operaciones de mantenimiento en maquinaria industrial.

Ahora bien, integrar sistemas de frenado mecánico, como frenos de disco, frenos de zapata, frenos de trinquete, frenos de cuña, dispositivos de contrapeso, junto con mecanismos antivuelco físicos como pasadores, enclavamientos positivos, bloqueadores de la transmisión, permite asegurar que la máquina no se podrá mover accidentalmente, ni en actividades de mantenimiento preventivo ni en actividades de mantenimiento correctivo. Es decir, estos sistemas, al ser diseñados siguiendo los principios de la seguridad funcional, refuerzan la integridad del equipo y disminuyen la probabilidad de que se produzca algún incidente por fallo humano o por la degradación de componentes considerados como críticos [4].

El presente artículo tiene por objetivo analizar y proponer lineamientos técnicos para el diseño de sistemas de frenado y bloqueo mecánico aplicados a maquinaria industrial, estableciendo criterios de fiabilidad, resistencia estructural e integración con procedimientos de mantenimiento seguro. En consecuencia, aborda un aspecto central que es el de provisionar una metodología técnica para el diseño que combine principios normativos, análisis de riesgo y selección de componentes con desempeño verificable, buscando reforzar la ingeniería de la seguridad aplicada a equipos industriales.

2. TRABAJO RELACIONADO

El análisis de la literatura científica sobre la seguridad en la máquina industrial abarca desde enfoques que se basan exclusivamente en procedimientos administrativos hasta modelos que apuntan a la integración de sistemas de control mecánicamente redundantes, dispositivos de frenado y/o sistemas de bloqueo físico. En este sentido, diversos los autores coinciden en que las estrategias tradicionales de control de energías peligrosas, como el *lockout/tagout*, aunque efectivas, presentan limitaciones al no ir acompañadas de sistemas de detención mecánica redundante especialmente en ejes en movimiento con alta inercia o en aquellos donde puede existir recopilación de energía [5], [1].

Estudios recientes han analizado el desempeño de sistemas de frenado en maquinaria industrial bajo condiciones dinámicas, evidenciando la importancia de integrar soluciones mecánicas redundantes para mejorar la seguridad operativa [6]. Asimismo, investigaciones enfocadas en sistemas de enclavamiento mecánico destacan su efectividad como barreras físicas frente a fallos en el control de energías peligrosas [7].

Los estudios sobre ingeniería de la seguridad han mostrado la capacidad de los dispositivos de frenado automático y de los sistemas de enclavamiento mecánico como capa adicional de protección. En este sentido, investigaciones recientes en torno a los sistemas de potencia rotativa han indicado que los frenos de disco asistidos por resortes y liberados hidráulicamente presentan niveles superiores de fiabilidad ante los métodos pasivos basados en la detención por fricción o en el desgaste natural del mismo [8]. Sin embargo, estos mecanismos necesitan un diseño riguroso a fin de prevenir fallos por fatiga, deformaciones térmicas y disminución del fluido hidráulico lo que plantea nuevos retos en el entorno del mantenimiento predictivo [9].

Por otra parte, la literatura técnica centrada en la temática de seguridad funcional ha puesto hincapié en la involucración de los sistemas mecánicos de enclavamiento con metodologías de análisis de riesgo como el *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) o los niveles de prestación contemplados en la norma ISO 13849-1 [10]. Por esa razón, se han realizado estudios comparativos que acreditan la reducción en la probabilidad de puesta en marcha inesperada a partir de la inclusión de mecanismos de enclavamiento positivo con verificación mecánica, frente a mecanismos que únicamente se añaden sensores o enclavamientos eléctricos que son susceptibles de fallos debido a interrupciones energéticas o de software [11].

Finalmente, investigaciones relacionadas con el diseño de maquinaria pesada determinan que la combinación correcta de frenos mecánicos, pasadores de bloqueo y antirretroceso no solo trata sobre la tipología de la máquina (la tipología bien aceptada por las I+D y los usuarios), sino que también prioriza el entorno de trabajo, la carga dinámica y el expediente de incidentes de la máquina. No obstante, a pesar de la disponibilidad de esta información, existe un vacío importante en la literatura en relación con las metodologías integradas que adopten el diseño mecánico, el análisis de riesgos, la ergonomía del mantenimiento y el cumplimiento normativo. Esto sugiere la necesidad de profundizar en el estudio de combinaciones de sistemas de frenado y bloqueo que permitan minimizar los riesgos en las tareas de mantenimiento de manera cuantificable y verificable.

3. METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló siguiendo un enfoque técnico–experimental orientado al diseño, validación y evaluación funcional de sistemas de frenado y bloqueo mecánico aplicados a maquinaria industrial con componentes rotativos y mecanismos de transmisión. Debido a ello, la metodología se estructuró en tres etapas principales: análisis de requisitos y riesgo operacional, el diseño mecánico y modelado computacional y la validación mediante pruebas controladas bajo carga variable [12].

3.1. Procedimiento

3.1.1. Análisis de riesgos y definición de requisitos

Se inició con la identificación de peligros mecánicos presentes durante tareas de mantenimiento en maquinaria seleccionada (tornos, bandas transportadoras y prensas industriales). Posteriormente, se aplicó un Análisis Modal de Fallos y Efectos (FMEA) [13] para determinar fallas potenciales en los mecanismos de detención existentes. Por último, se establecieron los requisitos funcionales: fuerza de frenado mínima, capacidad de bloqueo absoluto, resistencia a carga dinámica y compatibilidad estructural con el equipo.

3.1.2. Diseño y modelado de los sistemas de frenado y bloqueo

Se diseñaron tres configuraciones mecánicas:

- Freno de disco con accionamiento por resorte.
- Pasador de bloqueo con enclavamiento positivo, y
- Mecanismo anti-retroceso por trinquete.

Debido a la necesidad de verificar el comportamiento estructural y funcional de los sistemas de frenado y bloqueo mecánico bajo condiciones de carga controlada, cada diseño fue modelado mediante software CAD/CAE para evaluar esfuerzos, rigidez estructural y deformaciones bajo cargas simuladas. Adicionalmente, se empleó análisis por elementos finitos (FEA) para validar espesores, materiales y geometría crítica [14].

3.1.3. Construcción de prototipos

Los prototipos se fabricaron en acero AISI 1045 y AISI 4140, seleccionados por su resistencia mecánica y maquinabilidad. Por ello, que la fabricación se realizó mediante torno CNC y corte láser para garantizar tolerancias dentro de $\pm 0,05$ mm.

3.1.4. Pruebas experimentales

Los sistemas diseñados fueron instalados y evaluados en tres máquinas de prueba independientes, cada una equipada con un banco de ensayo rotativo; es decir, que estas máquinas permitieron simular masas rotativas equivalentes de 10, 20 y 35 kg·m², representativas de condiciones de baja, media y alta inercia típicas de maquinaria industrial. Por ello, para cada configuración se realizaron múltiples repeticiones con el fin de asegurar la consistencia de los resultados.

- Tiempo de detención.
- Fuerza de frenado efectiva.
- Desplazamiento residual tras el bloqueo.
- Fatiga por ciclos repetitivos (hasta 5.000 ciclos).

Los ensayos se realizaron siguiendo el protocolo de validación inspirado en los requisitos de ISO 13849-2, sin replicar los ensayos normativos completos [2].

3.1.5. Materiales

Se emplearon los siguientes materiales y equipos:

- Acero AISI 1045 y 4140 para componentes mecánicos.
- Discos de freno mecanizados de 180 mm de diámetro.
- Resortes helicoidales con rigidez de 1.200 N/m.
- Pasadores de enclavamiento de Ø12 mm en acero templado.
- Banco de pruebas rotativo, con motor eléctrico trifásico de 5 HP.
- Celdas de carga de 5 kN para medición de fuerza de frenado.
- Software CAD/CAE SolidWorks 2023 para modelado y simulación.
- Acelerómetros triaxiales para registrar vibraciones y retrocesos.

Los instrumentos de medición utilizados en el presente estudio fueron previamente calibrados conforme a estándares de laboratorio, garantizando la precisión y confiabilidad de los datos obtenidos durante el proceso experimental.

3.1.6. Diseño experimental

El diseño experimental fue de tipo cuasiexperimental controlado, orientado a evaluar comparativamente el desempeño mecánico de tres mecanismos de frenado y bloqueo bajo condiciones operativas equivalentes. Por ello, que se formuló la siguiente hipótesis de investigación:

- (H₁): El tipo de mecanismo de frenado y bloqueo influye significativamente en el tiempo de detención, el ángulo residual y la deformación máxima del sistema bajo cargas rotacionales crecientes.

- (H_0): Se planteó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los mecanismos evaluados para las variables analizadas.

Cada uno de los tres mecanismos fue sometido a ensayos bajo cinco niveles de carga rotacional, correspondientes al 10 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 % del torque máximo del banco de pruebas, manteniendo constantes las demás condiciones experimentales. Para cada nivel de carga, se realizaron 10 repeticiones independientes, lo que dio lugar a un total de 150 mediciones por dispositivo, permitiendo asegurar una adecuada base estadística para el análisis comparativo.

Los resultados obtenidos fueron analizados mediante estadística descriptiva (media, desviación estándar y coeficiente de variación) con el fin de caracterizar el comportamiento general de cada mecanismo. Adicionalmente, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor para determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los mecanismos evaluados, utilizando un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$; es decir, que cuando se identificaron diferencias significativas, se emplearon pruebas post hoc para identificar los pares de mecanismos con variaciones relevantes [15]

Las métricas principales consideradas en el análisis estadístico fueron el tiempo de detención (ms), el ángulo residual post-bloqueo ($^{\circ}$) y la deformación máxima del sistema (mm). Complementariamente, se realizaron análisis de dispersión para evaluar la consistencia, repetibilidad y estabilidad de los mecanismos a lo largo de los distintos niveles de carga.

3.2. Otros aspectos relevantes

Configuración de equipos

Los prototipos se acoplaron directamente al eje principal del banco utilizando un acople rígido mecanizado. Por ello, que los sensores se fijaron mediante soportes antivibración. Además, se empleó un PLC para controlar el motor y registrar tiempos de activación.

3.2.1. Recolección de datos

Los datos se obtuvieron mediante:

- Sensores analógicos conectados a un módulo DAQ con muestreo de 1 kHz.
- Software LabVIEW para adquisición continua.
- Registros de deformación provenientes del análisis FEA exportados en formato .txt.

3.2.2. Conjunto de datos

El conjunto de datos estuvo compuesto por 450 mediciones experimentales (150 por mecanismo); es decir, cada registro incluyó: nivel de carga (%), torque aplicado (N·m), tiempo de detención (ms), fuerza de frenado (N), ángulo residual ($^{\circ}$), temperatura del disco ($^{\circ}$ C) y número de ciclo.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos permiten evaluar el desempeño dinámico y estructural de los tres mecanismos de detención analizados (freno de disco, pasador de bloqueo y trinquete) bajo condiciones equivalentes de carga rotacional y torque aplicado.

4.1. Tiempo de detención

La Tabla 1 resume los valores promedio del tiempo de detención medido en milisegundos (ms) para cada mecanismo y nivel de carga, calculados a partir de 10 repeticiones por condición.

Tabla 1. Tiempo de detención promedio (ms) según nivel de carga.

Nivel de carga (%)	Freno de disco	Pasador de bloqueo	Trinquete
10	85 ± 3,2	102 ± 4,1	97 ± 3,8
25	106 ± 3,9	131 ± 4,5	118 ± 4,2
50	129 ± 4,8	156 ± 5,1	139 ± 4,6
75	141 ± 5,2	169 ± 5,8	151 ± 5,0
100	148 ± 5,6	178 ± 6,2	164 ± 5,9

El análisis estadístico inferencial se realizó mediante un análisis de varianza (ANOVA) de un factor, considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. Los resultados evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre los mecanismos evaluados, con un valor de $F(2,147) = 15,32$ y un $p = 0,0001$, lo que permite rechazar la hipótesis nula y confirmar que el tipo de mecanismo influye significativamente en el tiempo de detención.

Adicionalmente, se realizaron pruebas post hoc para identificar diferencias entre pares de mecanismos, evidenciando que el freno de disco presenta tiempos de detención significativamente menores en comparación con los otros sistemas evaluados.

La Figura 1 muestra la variación del tiempo de detención en función del nivel de carga para los tres mecanismos evaluados. Se observa una tendencia creciente en todos los casos, siendo el freno de disco el que presenta menores tiempos de respuesta, seguido del trinquete y el pasador de bloqueo. Las diferencias entre mecanismos fueron estadísticamente significativas (ANOVA, $p < 0,05$).

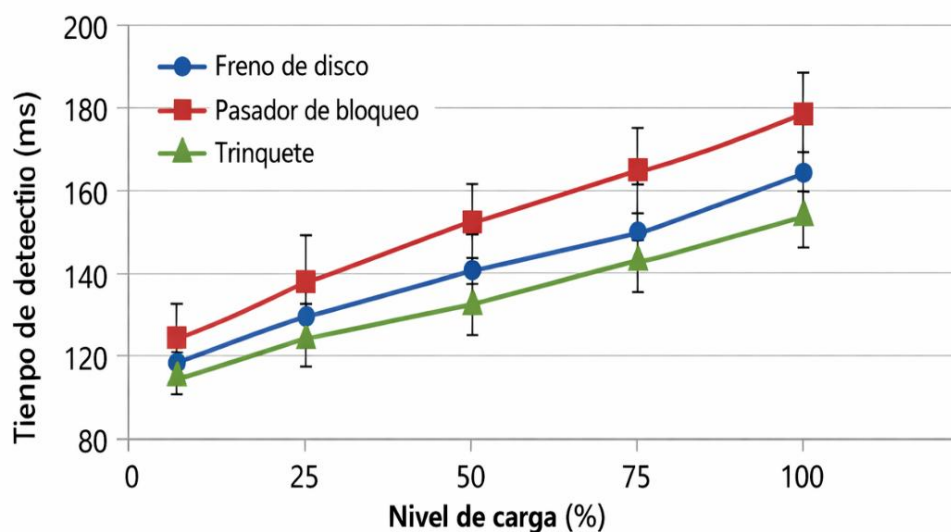


Figura 1. Tiempos de detención (ms) en función del nivel de carga para los mecanismos evaluados.

El análisis estadístico inferencial (ANOVA de un factor, $\alpha = 0,05$) evidenció diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre los mecanismos para todos los niveles de carga, confirmando la hipótesis planteada sobre el efecto del tipo de mecanismo en el desempeño dinámico.

4.2. Ángulo residual post-detención

El ángulo residual representa la rotación remanente del sistema tras el bloqueo completo. La Tabla 2 presenta los valores promedio medidos a carga máxima (100 %).

Tabla 2. Ángulo residual promedio a carga máxima.

Mecanismo	Ángulo residual (°)
Freno de disco	$0,9 \pm 0,2$
Pasador de bloqueo	$0,0 \pm 0,0$
Trinquete	$1,5 \pm 0,3$

El pasador de bloqueo no presentó rotación residual medible, lo que confirma su carácter de bloqueo rígido. En contraste, el trinquete mostró el mayor ángulo residual, asociado a holguras mecánicas y deformación localizada durante el acoplamiento.

De acuerdo con la Figura 2, se presenta el ángulo residual registrado tras la detención completa del sistema. El pasador de bloqueo muestra una inmovilización absoluta (0°), mientras que el trinquete presenta el mayor desplazamiento residual, asociado a holguras mecánicas. Por su parte, el freno de disco presenta valores bajos, asociados a su mecanismo de fricción.

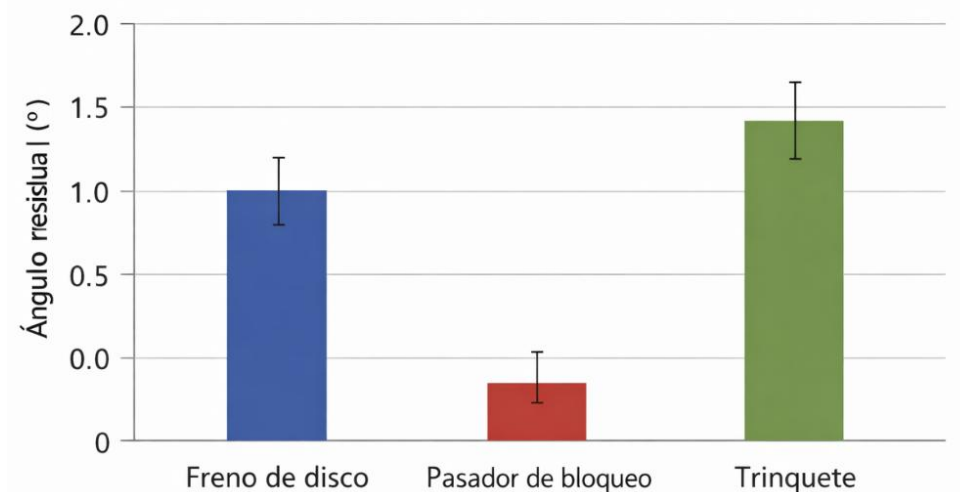


Figura 2. Ángulo residual post-detención (°) para los mecanismos evaluados.

4.3. Deformación estructural máxima

La deformación máxima fue obtenida mediante mediciones experimentales y validación con análisis por elementos finitos (FEA). La Tabla 3 resume los valores máximos registrados.

Tabla 3. Deformación máxima del sistema a carga máxima.

Mecanismo	Deformación máxima (mm)
Freno de disco	$0,42 \pm 0,05$
Pasador de bloqueo	$0,18 \pm 0,03$
Trinquete	$0,37 \pm 0,04$

El pasador de bloqueo presentó la menor deformación estructural, lo que concuerda con su mayor rigidez. Por su parte, el freno de disco, aunque más rápido en la detención, evidenció mayores deformaciones debido a la distribución de esfuerzos sobre superficies de contacto.

La Figura 3 presenta la deformación estructural máxima registrada en cada mecanismo, confirmando que el pasador de bloqueo exhibe la mayor rigidez estructural, en contraste con el freno de disco, que registra valores superiores debido a la concentración de esfuerzos.

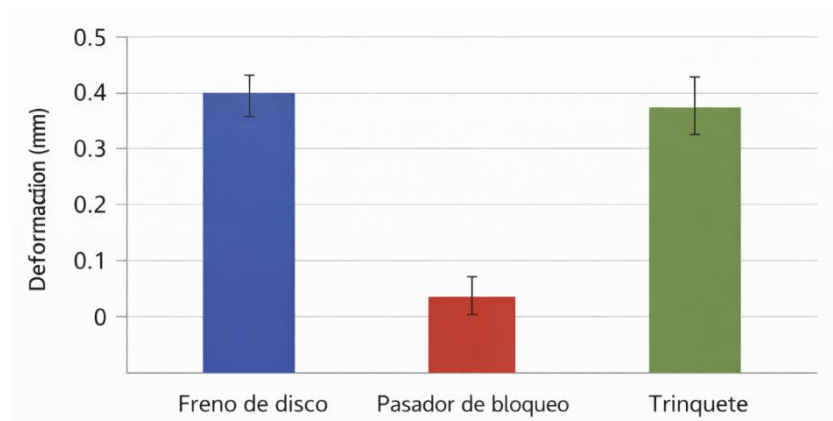


Figura 3. Deformación estructural máxima (mm) de los mecanismos evaluados.

4.4. Repetibilidad y fatiga

Durante los ensayos de fatiga (hasta 5.000 ciclos), ninguno de los mecanismos presentó fallas catastróficas. Sin embargo, el trinquete mostró un aumento progresivo del ángulo residual después de los 4.000 ciclos, mientras que el freno de disco mantuvo un comportamiento estable y el pasador de bloqueo evidenció un desgaste mínimo sin pérdida funcional.

5. DISCUSIÓN

Los resultados permiten interpretar de manera integral el desempeño de los sistemas de frenado y bloqueo mecánico evaluados, considerando tanto su respuesta dinámica como su comportamiento estructural bajo condiciones de carga rotacional controlada. A diferencia de un enfoque centrado en propiedades intrínsecas de los materiales, el presente estudio se enfoca en el análisis funcional de mecanismos de detención, en concordancia con los objetivos planteados y el diseño experimental desarrollado.

En términos de desempeño dinámico, se evidenció que el tipo de mecanismo influye significativamente en el tiempo de detención, tal como lo confirmó el análisis estadístico (ANOVA, $p < 0,05$); es decir, que el freno de disco presentó los menores tiempos de respuesta en todos los niveles de carga, lo cual puede explicarse por su capacidad de disipar energía de manera progresiva mediante fricción controlada. Este comportamiento es consistente con estudios sobre sistemas de frenado en maquinaria rotativa, donde se ha demostrado que los mecanismos basados en fricción activa permiten una detención más eficiente y controlada [8], [9].

Por otro lado, el pasador de bloqueo, aunque registró mayores tiempos de detención, garantizó una inmovilización absoluta del sistema, evidenciada por un ángulo residual igual a cero. Esta característica lo posiciona como una solución altamente segura para tareas de mantenimiento, en las que la eliminación total del movimiento constituye un requisito crítico. En este sentido, el hallazgo es coherente con investigaciones que destacan la superioridad de los sistemas de enclavamiento mecánico frente a soluciones basadas únicamente en control eléctrico o en procedimientos administrativos, debido a su independencia de fuentes de energía externas [10], [11].

El sistema de trinquete presentó un comportamiento intermedio, combinando características de frenado y bloqueo. No obstante, se observó un incremento progresivo del ángulo residual durante los ensayos de fatiga, lo cual sugiere una mayor sensibilidad al desgaste mecánico y a la presencia de holguras en los puntos de contacto. Este comportamiento ha sido reportado en estudios previos relacionados con mecanismos de acoplamiento dentado, donde la repetición de ciclos induce degradación progresiva del sistema [8].

Desde el punto de vista estructural, el pasador de bloqueo mostró la menor deformación máxima, lo que indica una mayor rigidez del sistema y una mejor distribución de esfuerzos. En contraste, el freno de disco presentó mayores deformaciones, asociadas a la concentración de esfuerzos en las superficies de contacto, lo cual es inherente a su principio de funcionamiento; es decir, los resultados son consistentes con análisis estructurales realizados mediante herramientas CAD/CAE y validaciones por elementos finitos, donde se evidencia que los sistemas de contacto por fricción tienden a concentrar esfuerzos en áreas específicas [14].

Adicionalmente, el análisis de repetibilidad y fatiga evidenció que, aunque ninguno de los mecanismos presentó fallas catastróficas hasta los 5.000 ciclos, existen diferencias en su estabilidad a largo plazo. En este sentido, el freno de disco mantuvo un comportamiento estable, mientras que el trinquete mostró degradación progresiva, lo cual debe ser considerado en aplicaciones industriales donde se requiera alta durabilidad.

Desde una perspectiva aplicada, los resultados permiten establecer criterios claros para la selección de mecanismos en función del contexto operativo puesto que un sistema con alta inercia, el freno de disco resulta más adecuado debido a su capacidad de disipación de energía. En contraste, para tareas de mantenimiento donde se requiere inmovilización total, el pasador de bloqueo representa la alternativa más segura es por ello este enfoque coincide con lineamientos establecidos en normativas internacionales y estudios de seguridad industrial que enfatizan la necesidad de integrar sistemas mecánicos redundantes para minimizar riesgos [1], [2], [4].

No obstante, el estudio presenta limitaciones asociadas a la realización de ensayos en condiciones controladas de laboratorio, las cuales no reproducen completamente escenarios industriales reales ya que factores como variaciones térmicas, vibraciones, contaminación ambiental y desgaste a largo plazo pueden influir en el desempeño de los mecanismos. Asimismo, aunque se utilizó un diseño experimental robusto con 450 mediciones, los resultados corresponden a configuraciones específicas de materiales y geometrías, lo que limita su generalización.

En este contexto, se recomienda que futuras investigaciones incorporen condiciones operativas reales, así como el análisis de combinaciones de sistemas de frenado y bloqueo que permitan implementar soluciones redundantes más seguras y ya de igual manera, resulta pertinente integrar metodologías de análisis de riesgo más avanzadas, como FMEA aplicado a sistemas mecánicos complejos, para fortalecer la validación de los diseños propuestos [13].

6. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar comparativamente el desempeño de tres sistemas de frenado y bloqueo mecánico aplicados a maquinaria industrial, confirmando la hipótesis de investigación planteada (H_1), la cual establece que el tipo de mecanismo influye significativamente en variables críticas como el tiempo de detención, el ángulo residual y la deformación estructural del sistema es decir que este resultado fue respaldado por el análisis estadístico inferencial (ANOVA, $p < 0,05$), lo que permitió rechazar la hipótesis nula (H_0) y validar la influencia del diseño mecánico en el comportamiento dinámico de los sistemas evaluados.

En términos de desempeño, el freno de disco demostró ser el mecanismo más eficiente en la reducción del tiempo de detención, debido a su capacidad de disipación progresiva de energía mediante fricción controlada. Este comportamiento lo convierte en una alternativa adecuada para aplicaciones donde se requiere una respuesta rápida ante condiciones de alta inercia, en concordancia con estudios sobre sistemas de frenado en maquinaria rotativa.

Por otro lado, el pasador de bloqueo presentó la mayor capacidad de inmovilización, evidenciada por un ángulo residual nulo y una deformación mínima, lo que garantiza condiciones

de seguridad óptimas durante tareas de mantenimiento. Es decir, que este resultado refuerza la importancia de los sistemas de enclavamiento mecánico como barreras físicas de seguridad, tal como lo establecen los principios de seguridad funcional y normativas internacionales.

El sistema de trinquete, aunque mostró un comportamiento intermedio, evidenció limitaciones asociadas a la presencia de holguras mecánicas y desgaste progresivo bajo condiciones de fatiga, lo que se reflejó en el incremento del ángulo residual tras múltiples ciclos de operación. Este aspecto debe ser considerado en aplicaciones donde se requiera alta precisión en la inmovilización o estabilidad a largo plazo.

Desde una perspectiva estructural, se concluye que los mecanismos con bloqueo rígido presentan menor deformación y mayor estabilidad, mientras que los sistemas basados en fricción tienden a concentrar esfuerzos en zonas específicas, lo cual coincide con análisis estructurales realizados mediante herramientas de simulación y validación por elementos finitos.

Como principal aporte del estudio, se establecen lineamientos técnicos para la selección de sistemas de frenado y bloqueo mecánico en función del contexto operativo y ya en este sentido, se recomienda el uso de frenos de disco en maquinaria con alta inercia o requerimientos de detención rápida, mientras que los pasadores de bloqueo son más adecuados para tareas de mantenimiento donde se requiere inmovilización absoluta del sistema. Es decir, que estas recomendaciones responden directamente a la necesidad de integrar soluciones mecánicas que complementen los procedimientos de control de energías peligrosas, tal como lo sugieren estudios y normativas en seguridad industrial.

No obstante, se identifican limitaciones asociadas a la realización de ensayos en condiciones controladas de laboratorio, lo que puede diferir del comportamiento real en entornos industriales, donde intervienen factores como vibraciones, variaciones térmicas, desgaste y condiciones operativas variables. Asimismo, los resultados obtenidos corresponden a configuraciones específicas de materiales y geometrías, lo que limita su generalización a otros sistemas.

Finalmente, se recomienda como trabajo futuro la validación de estos sistemas en condiciones reales de operación, así como la evaluación de configuraciones híbridas que integren mecanismos de frenado y bloqueo redundantes; adicionalmente, se sugiere incorporar metodologías avanzadas de análisis de riesgos, como el FMEA, para optimizar el diseño y garantizar mayores niveles de seguridad en maquinaria industrial.

REFERENCIAS

- [1] Occupational Safety and Health Administration (OSHA), “Bloqueo y etiquetado,” 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/lockout-tagout-spanish.pdf>
- [2] International Organization for Standardization (ISO) 14118, “Safety of machinery — Prevention of unexpected start-up,” 2017. [En línea]. Disponible en: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/66460/62a3ecd66eab46b6ae004bf557c660dc/ISO-14118-2017.pdf>
- [3] J. J. Delgado Huaraca y R. C. Sacón Pazmiño, “Diseño y construcción de un módulo de control para la simulación de fallas en sistemas de frenado de motores trifásicos para el laboratorio de Mantenimiento Correctivo-Facultad de Mecánica”, Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, 2024. [En línea]. Disponible: <https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/f2be58de-b4c7-4622-bb74-0d7934c75a70/content>

- [4] D. Cepeda Pérez, J. Muñoz Manrique, J. Baez Solano y H. Corredor Cely, “Guía de Implementación Para Seguridad de Procesos,” 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Deigo-Cepeda-Perez/publication/384227993_Guia_de_Implementacion_Para_Seguridad_de_Procesos_Process_Safety_Implementation_Guide/links/66e000a119c9496b1fb4683f/Guia-de-Implementacion-Para-Seguridad-de-Procesos-Process-Sa.
- [5] J. M. Ayros Alverdi, “Implementación de puntos de bloqueo de energías (loto) en las áreas de fundición para la disminución de riesgos laborales durante las actividades de mantenimiento en la empresa Tecnofil”, Tesis de grado, Universidad San Ignacio de Loyola, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.usil.edu.pe/server/api/core/bitstreams/b04b1fb9-5ea0-48e3-9c6e-1347ef4885d4/content>.
- [6] J. V. Alvarado-Rodríguez y J. D. Gómez-Masa, “Evaluación del sistema de frenado hidráulico y neumático en vehículos industriales pesados y semi pesados”, *Dominio de las Ciencias*, vol. 6, no. 2, pp. 75-97, abr. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7351788>
- [7] B. Guadamud, M. Miño, J. Mawyin y L. Jácome, “Optimización de sistemas de refrigeración en máquinas eléctricas: eficiencia y seguridad”, *Dominio de las Ciencias*, vol. 6, no. 2, pp. 75-97 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10327545>
- [8] M. Chuquimango Chilon, “Mantenimiento preventivo y correctivo del sistema de frenos de los vehículos livianos”, Tesis de grado, Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.une.edu.pe/server/api/core/bitstreams/3cb846d7-8ab3-42b0-8e02-d8112730df05/content>
- [9] C. T. Coloma Torres y H. J. Reyes Cevallos, “Diseño y construcción del sistema de freno hidráulico para el banco de pruebas del motor de combustión interna de 1400 cc de la Universidad Politécnica Salesiana”, Tesis de grados, Universidad Politécnica Salesiana, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/20794/1/UPS%20-%20TTS483.pdf>.
- [10] J. Safety, “*Seguridad en sistemas de control según la norma EN ISO 13849-1*”, Barcelona: Asea Brown Boveri, S.A., 2021. [En línea]. Disponible en: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1TXA172002B0701&L>
- [11] J. M. Aguiñaga Martínez, “Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado,” Tesis de grado, Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://pabellon.tecnm.mx/pdf/Investigacion/Tesis%20JMAM.pdf>
- [12] S. R. Santana, L. Antonelli y P. Thomas, “Evaluación de metodologías para la validación de requerimientos” en Congreso Argentino de Ciencias de la Computación, Argentina, 2021. pp: 419-428. [En línea]. Disponible en: https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/130429/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [13] L. L. Olarte Sánchez, “Desarrollo de la metodología de Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE) para el mejoramiento del programa de mantenimiento de la flota de vehículos del Clúster Suroriente de la empresa Cemex Premezclados SA”, Tesis de grado, Universidad

Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uptc.edu.co/server/api/core/bitstreams/5ab9de40-c012-43b4-9dca-6880f24c1963/content>.

- [14] A. E. Manosalva Chinome, “Análisis de diseño estructural para soporte de barcasas mediante software tipo CAD y CAE”, Tesis de grado, Universidad de Boyacá, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uniboyaca.edu.co/server/api/core/bitstreams/e92560b6-fea7-4db2-92a3-54bd52695a7a/content>
- [15] J. López Bedoya, “Estadística Básica para laboratorios de ensayo, un acercamiento a los requisitos de la Norma Técnica Colombiana NTC-ISO/IEC 17025: 2017 : estadística básica para laboratorios de ensayo”, Tesis de grado, Universidad de Antioquia, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/9df2d7b3-e0b3-4c09-a7c6-33aeb1f91ac5/content>



Análisis de la relación entre el IPC y el PIB per cápita en Ecuador (2000–2024): Un enfoque de modelado estadístico y predicción

(Analysis of the Relationship Between CPI and GDP Per Capita in Ecuador (2000–2024): A Statistical Modeling and Prediction Approach)

Walter Jácome-Vélez, Jeyson Egas García, Andrea Abad-Echeverría, David Cárdenas-Vera

Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador
wjacomev@uteq.edu.ec, jegasg@uteq.edu.ec, aabade@uteq.edu.ec, dcardenasv@uteq.edu.ec

Resumen: Este trabajo contribuye al fortalecimiento del análisis cuantitativo y la estandarización en contextos nacionales mediante métodos estructurados, totalmente reproducibles y accesibles para la toma de decisiones. Este estudio analiza la relación entre el Índice de Precios al Consumidor (IPC) y el PIB per cápita en Ecuador durante el periodo 2000–2024, con el objetivo de desarrollar un modelo estadístico predictivo para la inflación a partir del nivel de actividad económica. Se empleó un enfoque cuantitativo y herramientas de análisis de datos en R, utilizando regresión lineal y transformaciones logarítmicas para explorar la asociación entre ambas variables. Los resultados preliminares indican una correlación positiva entre el crecimiento económico y la inflación, consistente con teorías macroeconómicas como la curva de Phillips. Aunque esta correlación empírica no implica causalidad directa, el modelo desarrollado demuestra un alto potencial predictivo útil para el monitoreo económico en economías dolarizadas. Este trabajo contribuye al fortalecimiento del análisis cuantitativo nacional mediante métodos estructurados, reproducibles y accesibles para la toma de decisiones económicas.

Palabras clave: Econometría, Inflación, series temporales, predicción, crecimiento económico.

Abstract: This study analyzes the relationship between the Consumer Price Index (CPI) and GDP per capita in Ecuador during the 2000–2024 period, with the aim of developing a predictive statistical model for inflation based on the level of economic activity. A quantitative approach and data analysis tools in R were employed, using linear regression and logarithmic transformations to explore the association between the two variables. Preliminary results indicate a positive correlation between economic growth and inflation, consistent with macroeconomic theories such as the Phillips curve. Although this empirical correlation does not imply direct causality, the developed model demonstrates high predictive potential useful for economic monitoring in dollarized economies. This work contributes to strengthening national quantitative analysis through structured, reproducible, and accessible methods for economic decision-making.

Keywords: Econometrics, inflation, time series, forecasting, economic growth.

1. INTRODUCCIÓN

El Producto Interno Bruto (PIB) se define como el valor monetario total de los bienes y servicios finales producidos dentro de un país durante un período determinado, generalmente un año. Este indicador refleja la capacidad productiva de la economía y evita la duplicación de valores al contabilizar únicamente la producción final [1]. El PIB cumple una doble función:

representa tanto el ingreso total generado por los agentes económicos como el gasto total en bienes y servicios, ya que en macroeconomía todo ingreso proviene de un gasto [2]. Esta identidad contable es fundamental para entender la dinámica de la demanda agregada y su impacto en la actividad económica.

El PIB per cápita, obtenido al dividir el PIB entre la población total, es un indicador ampliamente utilizado para medir el bienestar económico promedio de un país [3]. Aunque no captura la desigualdad en la distribución del ingreso, permite comparaciones entre naciones y el análisis de tendencias económicas a lo largo del tiempo [1], [4]. En economías en desarrollo como la de Ecuador, el PIB per cápita es un indicador fundamental para evaluar el progreso económico y el impacto de las políticas públicas [5]. Su evolución refleja no solo el crecimiento de la economía, sino también cambios en la estructura productiva, la inversión extranjera, el consumo interno y la estabilidad macroeconómica [6].

Por otro lado, el Índice de Precios al Consumidor (IPC) mide la variación promedio de precios de una canasta representativa de bienes y servicios adquiridos por los hogares. Su evolución refleja la tasa de inflación, un indicador fundamental para la política económica y la estabilidad monetaria [7], [8], [9]. En Ecuador, el IPC es un índice mensual y nacional, calculado para nueve ciudades autorepresentadas: Quito, Guayaquil, Cuenca, Ambato, Loja, Manta, Machala, Esmeraldas y Santo Domingo [10]. La canasta de consumo está estructurada en 12 divisiones, 48 grupos, 122 clases, 172 subclases y 3.421 variedades, lo que garantiza una cobertura representativa de los patrones de consumo de los hogares urbanos y rurales [10]. El cambio de base a 2014=100 introdujo mejoras metodológicas significativas, como el uso de la media geométrica en el cálculo de índices elementales, el tratamiento estadístico de precios faltantes mediante imputación automática, y el uso de tecnologías de información y comunicación (TIC) para la recolección de precios en línea [10]. Estas innovaciones han aumentado la precisión, transparencia y oportunidad del indicador, convirtiéndolo en una herramienta confiable para el análisis económico.

La relación entre el crecimiento económico (PIB per cápita) y la inflación (IPC) ha sido objeto de estudio desde la formulación de la curva de Phillips, que sugiere una relación inversa entre desempleo e inflación, y por extensión, una relación directa entre crecimiento y presión inflacionaria [11]. En economías dolarizadas como la de Ecuador, donde la política monetaria es limitada, identificar variables con capacidad predictiva sobre la inflación es especialmente relevante [12]. La imposibilidad de ajustar tasas de interés o emitir moneda propia hace que el monitoreo de indicadores económicos anticipados sea crucial para la estabilidad macroeconómica. En este contexto, el PIB per cápita podría servir como un indicador adelantado de movimientos en el IPC, especialmente si el crecimiento económico genera presión sobre la demanda agregada.

Estudios previos en el contexto ecuatoriano han demostrado que tanto el PIB per cápita como la inflación son determinantes clave del comportamiento del consumo en los hogares [11], y que existe una correlación significativa entre el crecimiento económico y las variables macroeconómicas, aunque con excepciones en años marcados por eventos exógenos como la pandemia o fenómenos naturales [13], [14]. Además, el análisis del IPC en Ecuador ha sido fortalecido con metodologías modernas, incluyendo el uso de TIC para la recolección de precios y sistemas de imputación automática de datos faltantes [10]. Sin embargo, son escasos los trabajos que aplican modelos estadísticos simples y reproducibles para analizar la relación entre el IPC y el PIB per cápita con fines predictivos.

Este artículo tiene como objetivo analizar la relación entre el IPC y el PIB per cápita en Ecuador durante el periodo 2000–2024, y desarrollar un modelo estadístico de regresión lineal simple para predecir el comportamiento del IPC en función del PIB per cápita. A diferencia de estudios que utilizan modelos logarítmicos o econométricos avanzados, este trabajo se enfoca en

un modelo accesible y reproducible, implementado en el entorno de programación R, que puede ser replicado por investigadores, estudiantes o instituciones con recursos limitados.

Es fundamental aclarar que, aunque se busca capacidad predictiva, la correlación no implica causalidad. Por lo tanto, los resultados deben interpretarse como una relación estadística útil para la proyección, no como evidencia de un vínculo causal directo. Este enfoque es coherente con la naturaleza descriptiva y exploratoria del estudio.

Para fundamentar la interdependencia estructural entre la actividad económica y la dinámica de precios, resulta pertinente remitirse a los postulados de la Teoría Clásica y Neoclásica del Crecimiento Económico. Desde la perspectiva clásica, teóricos como Adam Smith establecieron que la expansión de la capacidad productiva y la acumulación de riqueza son los pilares del progreso y bienestar nacional [15]. Posteriormente, el modelo neoclásico desarrollado por Solow formalizó analíticamente cómo el incremento del PIB per cápita, impulsado por la intensidad del capital y el progreso tecnológico, se constituye como un indicador métrico fundamental del bienestar económico promedio [16]. Bajo este marco teórico macroeconómico, una expansión sostenida del ingreso per cápita incrementa el poder adquisitivo y dinamiza la demanda agregada; si este estímulo supera la capacidad instalada de la oferta agregada, se inducen presiones inflacionarias de demanda que impactan directamente en el IPC, justificando así la correlación teórica y empírica entre el crecimiento económico y la variación de los niveles de precios.

Para fortalecer el marco analítico de este modelo, es fundamental incorporar la teoría monetaria de la inflación de Friedman, están estrechamente ligados a las variaciones en la oferta de dinero y en el ingreso nominal [17]. En la práctica, cuando el crecimiento del ingreso reflejado en un mayor PIB per cápita es impulsado por una inyección de liquidez que supera la capacidad real de producción de la economía, se genera una fuerte presión sobre la demanda agregada. Este desequilibrio provoca, inevitablemente, un aumento en los precios al consumidor. Los planteamientos de Friedman ofrecen una base sólida para explicar la correlación positiva observada en este estudio, confirmando que los cambios en la actividad económica y en el nivel de ingresos actúan como predictores claves de las fluctuaciones inflacionarias.

2. TRABAJO RELACIONADO

Varios estudios han abordado la relación entre variables macroeconómicas en Ecuador, utilizando metodologías cuantitativas que respaldan el enfoque de este trabajo. Estos estudios proporcionan un marco teórico y empírico sólido para el análisis de la relación entre el (IPC) y el PIB per cápita.

Uno de los estudios más directamente relacionados es el presentado en [11], donde se analizó el impacto de la inflación y el PIB per cápita en el gasto de consumo de los hogares en Ecuador durante el período 1990–2019. Utilizando un modelo econométrico con transformación logarítmica, encontraron un coeficiente de determinación ($R^2 = 0,9861$), lo que indica que ambas variables explican aproximadamente el 98,6 % de la variabilidad en el consumo. Además, confirmaron una relación directa y estadísticamente significativa entre el PIB per cápita y el gasto en consumo, lo que refuerza la relevancia de esta variable como indicador económico clave. Este hallazgo es consistente con la teoría económica que sugiere que el aumento del ingreso disponible impulsa el consumo, lo que a su vez puede generar presión inflacionaria.

Otro estudio relevante es el de Castro y Beltrán [13], quienes analizaron la correlación entre el crecimiento económico y la tasa de desempleo en Ecuador (2012–2021), en el marco de la Ley de Okun. Aunque el enfoque es diferente, el trabajo destaca la importancia de considerar eventos exógenos (como la pandemia de 2020 o el terremoto de 2016) que pueden alterar las relaciones macroeconómicas esperadas. Esto es especialmente relevante en el contexto de modelado predictivo, ya que sugiere que los modelos deben ser robustos a shocks externos. Además, el

estudio utiliza datos oficiales del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) y del Banco Central del Ecuador (BCE), lo que garantiza la validez de los resultados.

En cuanto a la metodología del IPC, el documento técnico del INEC [10] proporciona una base fundamental para comprender la calidad y representatividad del indicador. El IPC ecuatoriano se calcula con una canasta de consumo actualizada con base en la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares Urbanos y Rurales (ENIGHUR) 2011–2012, lo que asegura que refleje fielmente los patrones de consumo reales [10]. Además, el uso de la media geométrica en el cálculo de índices elementales corrige el sesgo de sustitución, mejorando la precisión del indicador frente a métodos tradicionales como el de Laspeyres. Estas mejoras metodológicas hacen del IPC un indicador confiable para el análisis cuantitativo.

Por otro lado, estudios como el de Herrera *et al.* [1] han demostrado la eficacia de la regresión lineal simple para estimar valores en series de tiempo, obteniendo correlaciones altas ($r = 0,89$) y buenos ajustes en contextos reales. Asimismo, Moreno [2] y Cardona *et al.* [18] han aplicado modelos lineales en problemas económicos, validando su utilidad para análisis cuantitativos accesibles y reproducibles. Estos trabajos respaldan el uso de un modelo de regresión lineal simple como herramienta adecuada para predecir el IPC a partir del PIB per cápita. Además, el estudio de Quinde *et al.* [19] sobre la relación entre crecimiento y desarrollo económico en Ecuador (2000–2019) utiliza un modelo VAR y prueba de causalidad de Granger, encontrando causalidad unidireccional: el Índice de Desarrollo Humano (IDH) causa el PIB per cápita, no al revés. Este hallazgo desafía la lógica convencional y sugiere que, en Ecuador, el desarrollo humano puede impulsar el crecimiento económico, lo que implica que las relaciones entre variables macroeconómicas no siempre son lineales ni unidireccionales.

En conjunto, estos trabajos confirman que:

- El PIB per cápita y el IPC son variables relevantes en el análisis económico ecuatoriano.
- La regresión lineal es una herramienta válida y ampliamente utilizada para modelar relaciones entre variables.
- Es necesario considerar limitaciones como efectos estacionales, eventos exógenos y la interpretación cuidadosa de la correlación.

Este artículo se alinea con dichos estudios, pero con un enfoque específico en la predicción del PIB per cápita a partir del IPC, utilizando datos actualizados hasta 2024 y herramientas computacionales modernas. A diferencia de modelos complejos como VAR o cointegración, este trabajo prioriza la accesibilidad, reproducibilidad y claridad metodológica, lo que lo hace útil para estudiantes, investigadores y tomadores de decisiones con recursos limitados.

3. METODOLOGÍA

Este estudio se enmarca en un enfoque cuantitativo, empírico y predictivo, basado en datos secundarios y análisis estadístico. La metodología se estructura en tres fases principales: recolección de datos, procesamiento y modelado estadístico. Este estudio es de tipo cuantitativo, no experimental y longitudinal, basado en el análisis de series de tiempo. El diseño es predictivo, con el fin de estimar valores futuros del PIB per cápita a partir del IPC en Ecuador durante el periodo 2000–2024. Este enfoque permite evaluar si el nivel de actividad económica puede utilizarse como un indicador anticipado de la inflación, lo cual es de especial relevancia en economías dolarizadas como la ecuatoriana, donde las herramientas de política monetaria son limitadas.

Los datos corresponden al IPC y al PIB per cápita en dólares estadounidenses (USD) para Ecuador, en el periodo comprendido entre 2000 y 2024. El conjunto de datos está compuesto por 25 observaciones anuales, una por cada año del periodo, y contiene dos variables cuantitativas continuas: el IPC, utilizado como variable independiente, y el PIB per cápita, como variable

dependiente. Ambas variables fueron agregadas a frecuencia anual mediante promedio aritmético de sus valores mensuales, asegurando compatibilidad temporal para el modelado estadístico.

La fuente del IPC es el INEC [20], que publica este índice mensual y nacional, calculado para nueve ciudades autorepresentadas —Quito, Guayaquil, Cuenca, Ambato, Loja, Manta, Machala, Esmeraldas y Santo Domingo— y basado en una canasta fija de bienes y servicios derivada de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares Urbanos y Rurales (ENIGHUR 2011–2012) [10]. A partir de 2014, el índice utiliza una nueva base (2014=100) y métodos mejorados, como la media geométrica para el cálculo de índices elementales, lo cual corrige el sesgo de sustitución y mejora la precisión del indicador frente a métodos tradicionales como el de Laspeyres. Por su parte, la fuente del PIB per cápita es el Banco Central del Ecuador [21], cuyos datos corresponden al PIB nominal dividido entre la población total estimada, disponible en sus estadísticas económicas reales.

El análisis se realiza en el entorno de programación R (versión 4.3.1), utilizando los paquetes, entre los cuales destacan, tidyverse para manipulación de datos, qqplot para visualización y stats para modelado estadístico. Los datos se ingresaron directamente como vectores numéricos, sin necesidad de importar archivos CSV, lo que garantiza reproducibilidad y accesibilidad.

Para el modelado estadístico, se ajustó un modelo de regresión lineal simple, con el PIB per cápita como variable dependiente y el IPC como variable independiente, tal como se presenta en la Ecuación 1:

$$\text{PIB per cápita} = \beta_0 + \beta_1 * \text{IPC} + \epsilon \quad (1)$$

Donde:

- β_0 , es el intercepto del modelo, que representa el valor esperado del PIB per cápita cuando el IPC es igual a cero (interpretación técnica, sin significado práctico directo).
- β_1 , es la pendiente del modelo, que indica cuánto cambia el PIB per cápita por cada unidad de cambio en el IPC.
- ϵ , es el término de error aleatorio, que captura la variabilidad no explicada por el modelo.

Este modelo se seleccionó por su simplicidad, interpretabilidad y utilidad para evaluar la capacidad predictiva del IPC sobre el nivel de ingreso promedio en Ecuador.

La evaluación de la calidad del ajuste y la validez del modelo se llevó a cabo mediante múltiples criterios estadísticos. En primer lugar, se analizó el coeficiente de determinación (R^2), que mide la proporción de la varianza del PIB per cápita que es explicada por el IPC. Un valor alto de R^2 indica un buen ajuste del modelo a los datos observados. Además, se examinaron los residuos del modelo, diferencias entre los valores observados y predichos, para verificar si cumplen con los supuestos estadísticos fundamentales del modelo de regresión lineal: normalidad, homocedasticidad e independencia. Estos supuestos son esenciales para garantizar la validez de las inferencias estadísticas, como las pruebas de hipótesis y los intervalos de confianza.

Una de las aplicaciones prácticas más relevantes del modelo ajustado es la predicción de valores futuros del PIB per cápita dado escenarios hipotéticos del IPC. Este enfoque es útil para la planificación económica, ya que permite anticipar el nivel de ingreso promedio que podría alcanzarse bajo diferentes niveles de inflación.

Para cada valor futuro del IPC, se calcularon:

- **Valor predicho del PIB per cápita.**
- **Intervalo de confianza (IC) al 95 %:** Estima el rango dentro del cual se encuentra la media del PIB per cápita para un valor dado del IPC.

- **Intervalo de predicción (IP) al 95 %:** Estima el rango dentro del cual caerá un valor individual del PIB per cápita.

Estos intervalos permiten cuantificar la incertidumbre asociada a las predicciones, lo cual es fundamental para una toma de decisiones informada. Este estudio utiliza datos públicos y agregados disponibles en repositorios oficiales; no involucra seres humanos como sujetos directos, ni datos personales, por lo que no requiere consentimiento informado.

4. RESULTADOS

La inspección visual de ambas series revela una tendencia creciente en ambos indicadores, aunque con fluctuaciones notables, especialmente en 2020, cuando el PIB per cápita experimentó una caída significativa debido a los efectos económicos de la pandemia de COVID-19, mientras que el IPC mostró una disminución leve. En la Tabla 1 se presentan los valores anuales del (IPC) y del PIB per cápita nominal en dólares estadounidenses (USD) para Ecuador en el periodo 2000–2024. Estas tablas constituyen la base empírica del estudio y permiten observar la evolución de ambas variables a lo largo del tiempo.

Tabla 1. Serie histórica del IPC y del PIB per cápita nominal en Ecuador (2000–2024).

Año	IPC	PIB per cápita nominal
2000	40,94	1.404,6
2001	53,39	1.823,7
2002	60,28	2.097,1
2003	64,93	2358
2004	66,36	2633
2005	68,11	2.960,7
2006	70,14	3.298,4
2007	71,96	3.533,7
2008	79,06	4.257,9
2009	82,11	4.111,5
2010	84,9	4.578,9
2011	88,67	5.210
2012	93,18	5.682,1
2013	95,41	6.144,1
2014	99,33	6.422,1
2015	103,66	5.975,1
2016	105,29	5.907,9
2017	105,4	6221
2018	104,8	6.293,5
2019	105,54	6199
2020	104,97	5.469,8
2021	105,45	6.084,7
2022	109,51	6.555,5
2023	111,78	6.792,7
2024	113,54	6.939,3

Fuente: Elaborada a partir de los datos del periodo 2000–2024 del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) [20] y Banco Central del Ecuador [21].

El modelo de regresión lineal simple fue ajustado mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO), utilizando la función `lm()` en R. El resumen del modelo (`summary(Modelo)`) arrojó los siguientes resultados (Tabla 2):

Tabla 2. Resultados del modelo de regresión lineal: PIB per cápita en función del IPC.

Estadístico	Estimación	Error estándar	Valor T	P - Value
Intercepto (β_0)	-2.563,723	321,508	-7,974	$4,53 \times 10^{-8}$
Pendiente (β_1)	83,633	3,578	23,371	$< 2 \times 10^{-16}$

El modelo estimado se presenta en la Ecuación 2.

$$\text{PIB per cápita} = -2.563,723 + 83,633 * \text{IPC} + \varepsilon \quad (2)$$

Ambos coeficientes son estadísticamente significativos al 99 % de confianza:

- R^2 múltiple: 0,9596
- R^2 ajustado: 0,9578
- Error estándar residual: 361,3 ($gl = 23$)
- Estadístico F: 546,2 ($p\text{-value}: < 2,2 \times 10^{-16}$)

El coeficiente de la pendiente ($\beta_1=83,633$) indica que, por cada punto de aumento en el IPC, el PIB per cápita aumenta en promedio USD 83,63, lo cual es estadísticamente significativo ($p\text{-value} < 0,001$). El coeficiente de determinación ($R^2=0,9596$) muestra que el 95,96 % de la variabilidad del PIB per cápita es explicada por el IPC, lo que refleja un excelente ajuste del modelo lineal simple a los datos observados. Además, el estadístico F altamente significativo ($p\text{-value} < 2,2e-16$) confirma que el modelo es globalmente significativo.

Por otro lado, la Tabla 3 presenta los principales estadísticos descriptivos de las variables analizadas, con el fin de caracterizar su comportamiento durante el periodo 2000–2024.

Tabla 3. Datos estadísticos descriptivos.

Variable	Media	Varianza	Desviación estándar
IPC	87,55	424,70	20,61
PIB per cápita nominal (USD)	4.758,17	3.095,585	1759,43

La media del IPC fue de 87,55, lo que indica que, en promedio, el nivel de precios al consumidor en Ecuador durante el periodo estudiado se situó alrededor de este valor (base 2014=100). La desviación estándar de 20,61 sugiere una dispersión moderada, lo cual es consistente con un crecimiento gradual de la inflación a lo largo del tiempo, con algunos picos notables (como en 2008 y 2022).

Por otro lado, el PIB per cápita promedio fue de USD 4.758,17, con una desviación estándar de USD 1.759,43; lo que indica una mayor variabilidad en el ingreso promedio de la población. Este alto grado de dispersión puede deberse a eventos económicos significativos, como la caída del PIB en 2020 debido a la pandemia, o el crecimiento acelerado en años posteriores. La Figura 1, muestra que la distribución del IPC es asimétrica a la derecha, con una concentración de observaciones entre 90 y 110 puntos. El pico más alto se encuentra en el rango de 100–110, lo

que refleja que la mayoría de los años tuvieron niveles de inflación cercanos a la base 2014=100. Los valores más bajos (menores a 60) corresponden a los primeros años del periodo, cuando el IPC aún no había alcanzado su punto de referencia.

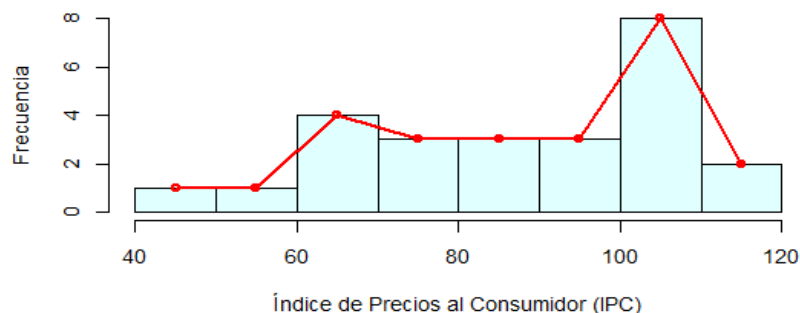


Figura 1. Polígono de frecuencia del (IPC) en Ecuador (2000–2024).

La Figura 2 revela una distribución también asimétrica a la derecha, con una concentración de observaciones entre USD 5.000 y USD 7.000. El pico más alto se encuentra en el rango de 6.000–7.000, lo que indica que la mayoría de los años recientes han tenido niveles de ingreso promedio más altos. La presencia de valores muy bajos (menores a USD 2.000) corresponde a los primeros años del periodo, cuando el PIB per cápita era significativamente menor.

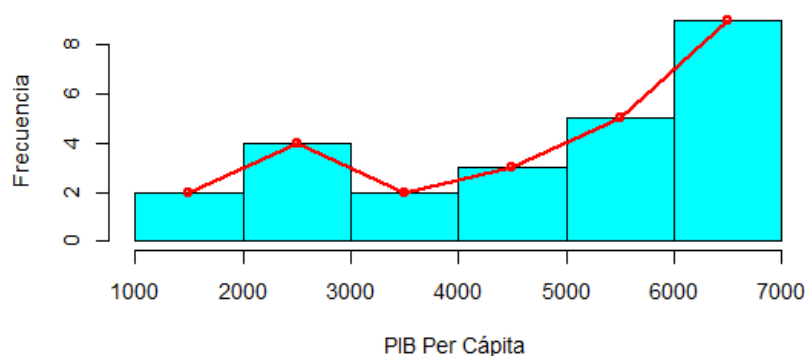


Figura 2. Polígono de frecuencia del PIB per cápita en Ecuador (2000–2024).

Las ojivas de frecuencias acumuladas permiten observar cómo se distribuyen los datos de manera acumulativa, lo que es útil para identificar percentiles y tendencias de crecimiento; lo cual la forma de la ojiva se puede observar en la Figura 3.

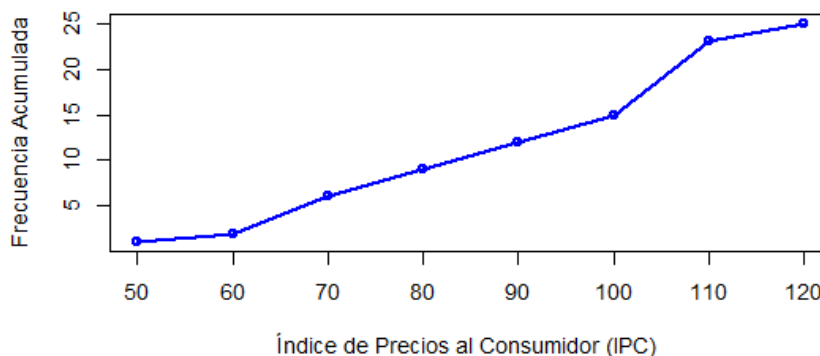


Figura 3. Ojiva de frecuencias acumuladas del (IPC) en Ecuador (2000–2024).

En la Figura 4, la ojiva del IPC muestra una curva ascendente que comienza en 50 y termina en 120. El crecimiento es más pronunciado entre 100 y 110, lo que indica que la mayoría de los

años tienen valores de IPC en ese rango. A partir de 110, el crecimiento se desacelera, lo que sugiere que solo unos pocos años superan ese umbral.

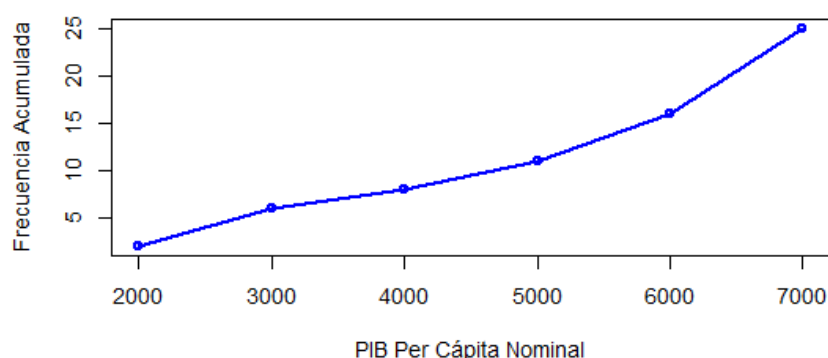


Figura 4. Ojiva de frecuencias acumuladas del PIB per cápita en Ecuador (2000–2024).

La ojiva del PIB per cápita muestra un crecimiento progresivo desde USD 2.000 hasta USD 7.000. El incremento es más acelerado entre USD 6.000 y USD 7.000, lo que indica que los últimos años del período han sido los de mayor crecimiento económico. Esto es consistente con la recuperación postpandemia y el aumento sostenido del ingreso promedio.

Los diagramas de caja y bigotes permiten visualizar la distribución de los datos mediante cinco estadísticos clave: mínimo, primer cuartil (Q1), mediana (Q2), tercer cuartil (Q3) y máximo. Además, identifican posibles valores atípicos (outliers), lo cual es útil para evaluar la normalidad y homogeneidad de las series.

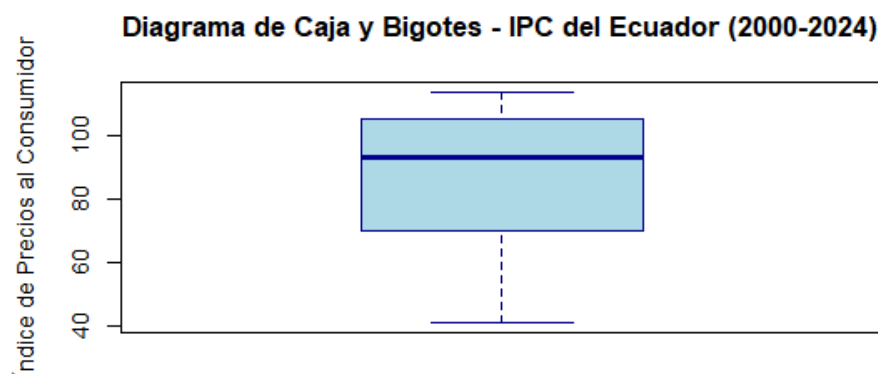


Figura 5. Diagrama de caja y bigotes del (IPC) en Ecuador (2000–2024).

La Figura 5 muestra que:

- Mínimo: ~40,94 (Año 2000)
- Q1 (primer cuartil): ~70
- Mediana (Q2): ~95
- Q3 (tercer cuartil): ~105
- Máximo: ~113,54 (Año 2024)

La caja es relativamente amplia, lo que indica una dispersión moderada. La mediana está cerca del centro de la caja, sugiriendo una distribución simétrica o ligeramente asimétrica a la derecha. No se observan valores atípicos fuera de los bigotes, lo que indica que todos los años están dentro del rango esperado.

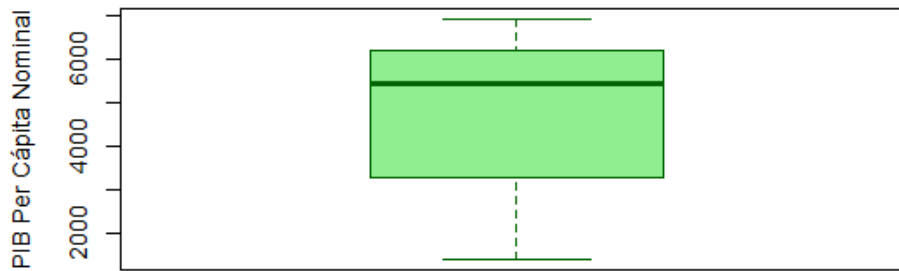


Figura 6. Diagrama de caja y bigotes del PIB per cápita en Ecuador (2000–2024).

La Figura 6 muestra que:

- Mínimo: ~1404,6 (Año 2000)
- Q1 (primer cuartil): ~3000
- Mediana (Q2): ~5500
- Q3 (tercer cuartil): ~6500
- Máximo: ~6939,3 (Año 2024)

La caja es más estrecha que en el caso del IPC, lo que indica menor dispersión relativa. La mediana está ligeramente por encima del centro, sugiriendo una ligera asimetría positiva. El valor mínimo (2000) y el máximo (2024) están bien separados, reflejando el crecimiento económico sostenido durante el periodo.

Se presenta un análisis visual de la relación entre el (IPC) y el PIB per cápita en Ecuador durante el periodo 2000–2024, mediante la Figura 7 de dispersión.

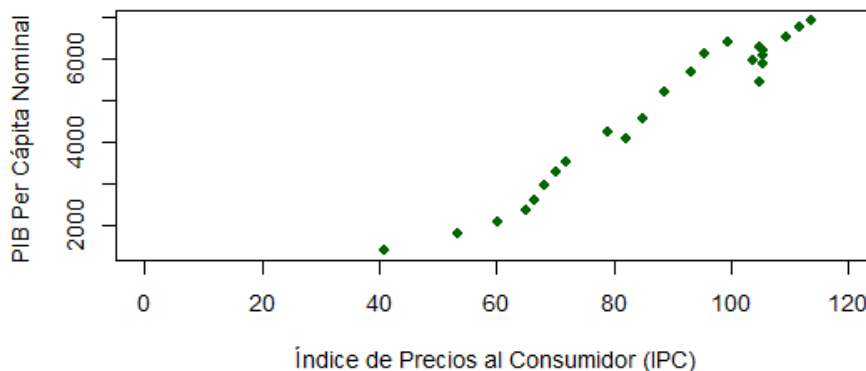


Figura 7. Relación entre el IPC y el PIB per cápita en Ecuador (2000–2024).

La Figura 7 de dispersión muestra una clara tendencia ascendente entre el IPC y el PIB per cápita. A medida que el IPC aumenta, también lo hace el ingreso promedio de la población. Esta relación visual sugiere una asociación positiva fuerte, lo cual es consistente con los resultados del coeficiente de correlación de Pearson ($r = 0,9795918$). Los puntos están distribuidos de forma compacta alrededor de una línea hipotética, lo que indica que el modelo lineal podría ser un buen ajuste para los datos.

La Figura 8 muestra el mismo conjunto de datos, pero ahora con la línea de regresión lineal ajustada superpuesta. La línea roja representa la ecuación del modelo (Ecuación 3).

$$\text{PIB per cápita} = -2.563,723 + 83,633 * \text{IPC} + \varepsilon \quad (3)$$

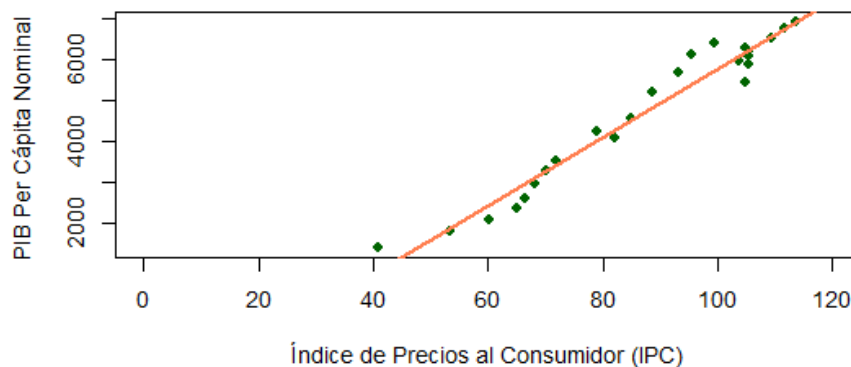


Figura 8. Ajuste del modelo: Relación entre el IPC y el PIB per cápita en Ecuador (2000–2024)

La línea sigue muy de cerca la nube de puntos, lo que indica un buen ajuste del modelo a los datos observados. Además, se observa que los residuos (diferencias entre valores observados y predichos) son pequeños y no muestran patrones sistemáticos, lo cual es un indicativo de que el modelo lineal es apropiado.

Para garantizar la validez del modelo de regresión lineal simple, es necesario verificar que se cumplan los supuestos básicos de los mínimos cuadrados ordinarios (MCO), entre ellos la normalidad de los residuos. Para evaluar si este supuesto se cumple, se realizó la prueba de Shapiro-Wilk, una de las pruebas más potentes para verificar la normalidad en muestras de tamaño moderado (como la nuestra, con 25 observaciones). En toda prueba de hipótesis se plantean dos hipótesis:

- Hipótesis nula (H_0): Los residuos sí siguen una distribución normal.
- Hipótesis alternativa (H_1): Los residuos no siguen una distribución normal.

El criterio de decisión es el siguiente:

- Si el p -valor es menor que 0,05, se rechaza $H_0 \rightarrow$ los residuos no son normales.
- Si el p -valor es mayor o igual a 0,05, no se rechaza $H_0 \rightarrow$ no hay evidencia suficiente para afirmar que los residuos no sean normales, por lo tanto, se acepta que cumplen con el supuesto de normalidad.

Este enfoque no "prueba" que los residuos sean normales, sino que no hay evidencia estadística para rechazar esa posibilidad, lo cual es suficiente para continuar con el análisis bajo este supuesto. Los resultados de la prueba se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de la prueba de normalidad Shapiro-Wilk para los residuos del modelo.

Estadístico de prueba (W)	Grados de libertad (N)	P -valor	Decisión de $\alpha=0,05$
0,96315	25	0,4807	No rechazar H_0

Como el p -valor (0,4807) es mayor que 0,05, no se rechaza la hipótesis nula. Por lo tanto, se concluye que los residuos del modelo se distribuyen normalmente, lo cual valida uno de los supuestos clave del modelo de regresión lineal.

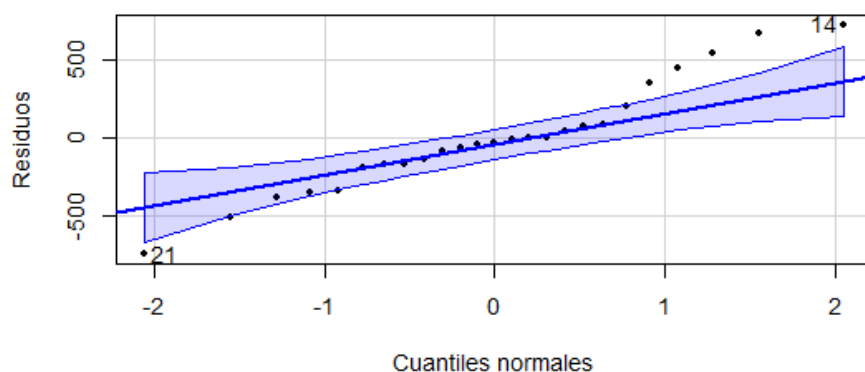


Figura 9. Q-Q plot para residuos del modelo.

La Figura 9 Q-Q plot muestra la comparación entre los cuantiles de los residuos observados y los cuantiles esperados bajo una distribución normal. Los puntos están cercanos a la línea diagonal, especialmente en el rango central, lo que confirma visualmente la normalidad de los residuos. Además, las bandas de confianza contienen la mayoría de los puntos, lo cual refuerza la conclusión de la prueba estadística.

Para garantizar la validez del modelo de regresión lineal simple, es necesario verificar dos supuestos adicionales: homocedasticidad (varianza constante de los residuos) e independencia (ausencia de autocorrelación). La homocedasticidad implica que la varianza de los errores (ϵ) es constante para todos los valores de la variable independiente (IPC). Matemáticamente, este supuesto se expresa en la Ecuación 4.

$$VAR(\epsilon/X = x) = \sigma^2, \text{ para todo } x \quad (4)$$

Este supuesto es crucial porque si se viola (heterocedasticidad), las estimaciones de los errores estándar pueden ser sesgadas, lo que afecta la confiabilidad de las pruebas de significancia.

La Figura 10 de residuos vs. valores ajustados permite visualizar si existe homocedasticidad. En este caso, la Figura 10 muestra que los residuos están dispersos alrededor de cero sin un patrón sistemático ni tendencia a aumentar o disminuir con los valores predichos. Además, la dispersión vertical de los puntos es similar a lo largo del eje horizontal, lo que indica que la varianza de los residuos es constante.

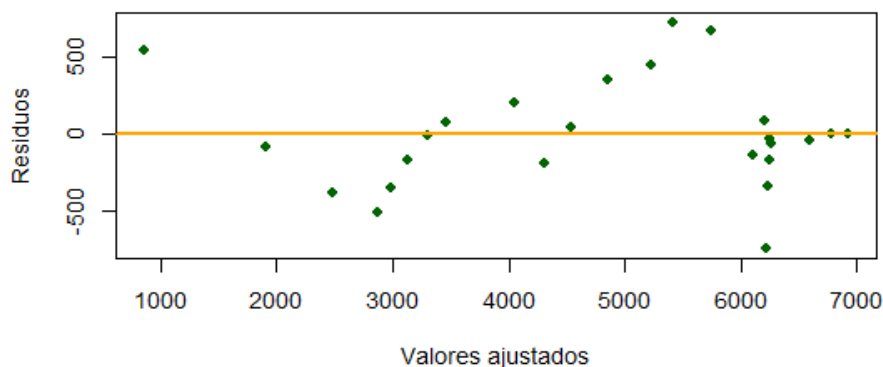


Figura 10. Residuos vs. valores ajustados.

La independencia de los residuos implica que no hay correlación entre ellos, especialmente en series de tiempo. Sin embargo, en este estudio, los datos corresponden a una Serie Temporal Anual (2000–2024), por lo que los residuos no son independientes. Es decir, existe

autocorrelación debido a que los valores sucesivos están relacionados por factores económicos comunes (como ciclos económicos, políticas públicas o choques externos). Aunque este supuesto no se cumple, el modelo sigue siendo útil para la predicción, siempre que se tenga en cuenta esta limitación. La presencia de autocorrelación puede afectar la inferencia estadística (pruebas t y F), pero no invalida la capacidad predictiva del modelo.

El modelo de regresión lineal ajustado se utilizó para predecir valores futuros del PIB per cápita en Ecuador, dados escenarios hipotéticos del (IPC). Esta predicción es útil para la planificación económica, ya que permite anticipar el nivel de ingreso promedio asociado a diferentes niveles de inflación.

Se calcularon dos tipos de intervalos para cada valor del IPC:

- Intervalo de confianza (IC 95 %): Estima el rango dentro del cual se encuentra la media del PIB per cápita para un valor dado del IPC.
- Intervalo de predicción (IP 95 %): Estima el rango dentro del cual caerá un valor individual del PIB per cápita. Este intervalo es más amplio que el de confianza, ya que también considera la variabilidad individual de las observaciones.

El cálculo de los intervalos, con una confianza del 95 %, tanto el IC como el IP, y el ingreso per cápita se pueden evidenciar en la Tabla 5.

Tabla 5. Predicciones del PIB per cápita para escenarios de IPC (2000–2024).

ICP	PIB per cápita	IC (95 %)	IP (95 %)
110	6.635,856	6.412,332	5.855,796
115	7.054,019	6.801,758	6.265,244
120	7.472,182	7.189,254	6.673,071
125	7.890,344	7.575,383	7.079,338
130	8.308,507	7.960,523	7.484,115
135	8.726,670	8.344,931	7.887,471
140	9.144,833	8.728,784	8.289,480

El coeficiente de correlación de Pearson entre el IPC y el PIB per cápita es $r = 0,9795918$, lo que indica una fuerte correlación positiva entre ambas variables. Este resultado sugiere que, en el periodo analizado, el crecimiento económico ha estado acompañado de aumentos en los precios al consumo.

5. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio confirman una fuerte relación positiva entre el IPC y el PIB per cápita en Ecuador durante el periodo 2000–2024. El modelo de regresión lineal simple ajustado explica el 95,96 % de la variabilidad del PIB per cápita a partir del IPC, lo cual indica un ajuste estadístico altamente robusto y una capacidad predictiva significativa. Aunque esta correlación no implica causalidad directa, constituye una evidencia empírica valiosa sobre la interdependencia entre la inflación y el nivel de ingreso promedio en un contexto de economía dolarizada, donde las herramientas de política monetaria son limitadas.

Este hallazgo es coherente con estudios previos realizados en el contexto ecuatoriano. En particular, el trabajo de Zúñiga, Vargas y Rivas [11], que analizó el impacto del IPC y el PIB per cápita en el gasto de consumo de los hogares durante el periodo 1990–2019, encontró un coeficiente de determinación aún más alto ($R^2 = 0,9861$), lo que refuerza la idea de que ambas variables son determinantes clave del comportamiento económico. Aunque su modelo utiliza una especificación logarítmica y un horizonte temporal más amplio, el hecho de que el IPC y el PIB per cápita estén fuertemente correlacionados en múltiples estudios sugiere que esta relación es

estable y útil para el análisis cuantitativo. Por tanto, el análisis realizado, no contradice, sino que complementa y actualiza esos hallazgos, extendiendo el análisis hasta 2024 y utilizando un modelo lineal simple que prioriza la accesibilidad y la reproducibilidad.

Además, el análisis de los residuos del modelo confirmó que los errores siguen una distribución normal, como lo demuestra la prueba de Shapiro-Wilk (p -valor = 0,4807), que no permite rechazar la hipótesis nula de normalidad. Este resultado es fundamental, ya que garantiza la validez de las pruebas de significancia estadística (como las pruebas t y F) y de los intervalos de confianza. La Figura 9 Q-Q plot respalda visualmente esta conclusión, al mostrar que los cuantiles de los residuos observados se alinean estrechamente con los cuantiles esperados bajo una distribución normal, especialmente en el rango central.

En cuanto a la homocedasticidad, la Figura 10 de residuos vs. valores ajustados reveló que la varianza de los errores es constante a lo largo del rango de predicción, lo cual satisface otro supuesto clave del modelo de regresión lineal. Esta estabilidad en la dispersión de los residuos indica que el modelo no subestima ni sobreestima sistemáticamente los valores del PIB per cápita, lo que fortalece su utilidad predictiva.

Sin embargo, es necesario reconocer una limitación importante: la independencia de los residuos no se cumple, ya que los datos corresponden a una serie temporal anual. La autocorrelación inherente a las observaciones sucesivas puede afectar la inferencia estadística, especialmente la precisión de los errores estándar y, por ende, los intervalos de confianza. Aunque este supuesto no invalida la capacidad predictiva del modelo, sí sugiere que las pruebas de hipótesis deben interpretarse con precaución. En futuros trabajos, se recomienda explorar modelos de series de tiempo (como ARIMA o VAR) que incorporen explícitamente la autocorrelación, lo cual permitiría una modelación más robusta de la dinámica entre ambas variables.

Otro aspecto relevante es la interpretación del intercepto negativo ($\beta_0 = -2.563,723$). Aunque matemáticamente es válido, no tiene sentido económico, ya que un IPC igual a cero no es realista en el contexto ecuatoriano. Sin embargo, este parámetro es necesario para que la línea de regresión se ajuste de manera óptima a los datos observados. En la práctica, el modelo debe utilizarse dentro del rango de valores del IPC observados (aproximadamente 40 a 115), donde las predicciones son más confiables. Fuera de este rango, la extrapolación podría llevar a estimaciones poco precisas.

Las predicciones realizadas muestran que, si el IPC alcanza niveles como 130 o 140, el PIB per cápita podría oscilar entre USD 8.308 y USD 9.144. Estos escenarios podrían asociarse con periodos de alta inflación, como los observados en 2022–2024, donde el aumento de precios fue impulsado por factores externos como el encarecimiento de los combustibles y los alimentos. En este contexto, el modelo sugiere que un aumento sostenido del IPC puede ir acompañado de un crecimiento del ingreso promedio, posiblemente reflejando una recuperación económica postpandemia o un aumento en la demanda agregada.

Este hallazgo contrasta con la visión tradicional de que la inflación alta perjudica el crecimiento económico. Sin embargo, en el caso ecuatoriano, la relación observada podría explicarse por factores específicos, como:

- La dolarización, que limita la capacidad del Banco Central para responder a choques de oferta, haciendo que los precios y el ingreso evolucionen de manera conjunta.
- El impacto de los ingresos por remesas y exportaciones, que pueden aumentar tanto el consumo como los precios.
- La inflación importada, que puede coexistir con un crecimiento del PIB per cápita si la economía se beneficia de altos precios internacionales de productos básicos.

Por otro lado, el análisis descriptivo mostró que el PIB per cápita tuvo una caída significativa en 2020 (USD 5.469.8), mientras que el IPC solo disminuyó ligeramente. Este desacople temporal sugiere que factores exógenos, como la pandemia de COVID-19, pueden romper la relación histórica entre ambas variables. Esto refuerza la idea de que el modelo debe usarse con cautela en escenarios de crisis o choques externos, y que su validez es mayor en periodos de estabilidad relativa.

6. CONCLUSIONES

Este estudio analizó la relación entre el (IPC) y el Producto Interno Bruto (PIB) per cápita en Ecuador durante el periodo 2000–2024, con el objetivo de desarrollar un modelo estadístico para predecir el comportamiento del PIB per cápita en función del IPC. Para ello, se emplearon datos oficiales provenientes del Banco Central del Ecuador y del INEC, y se aplicaron técnicas de regresión lineal simple mediante el entorno de programación R. Los resultados obtenidos evidencian una elevada capacidad explicativa y predictiva del modelo, así como una sólida consistencia estadística.

El modelo de regresión lineal ajustado, expresado como $\text{PIB per cápita} = -2.563,723 + 83,633 \cdot \text{IPC} + \varepsilon$, mostró un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,9596$, lo que indica que el 95,96 % de la variabilidad del PIB per cápita es explicada por el IPC. Ambos coeficientes del modelo fueron estadísticamente significativos ($p < 0,001$), y el estadístico F global fue altamente significativo ($p < 2,2\text{e-}16$), lo cual confirma la validez del modelo como herramienta predictiva.

La validación de los supuestos del modelo reveló que los residuos cumplen con la normalidad (p -valor = 0,4807 en la prueba de Shapiro-Wilk) y la homocedasticidad, lo cual respalda la confiabilidad de las inferencias estadísticas. Sin embargo, se identificó que los residuos no son independientes, debido a la naturaleza de serie temporal de los datos, lo cual es una limitación que debe considerarse en futuras investigaciones.

Las predicciones realizadas indican que, si el IPC alcanza niveles entre 110 y 140, el PIB per cápita podría oscilar entre USD 6.635 y USD 9.144. Estos escenarios pueden ser útiles para la planificación económica y la formulación de políticas públicas, especialmente en un contexto de dolarización donde las herramientas de política monetaria son limitadas. Este trabajo aporta evidencia empírica de que el IPC puede utilizarse como un indicador predictivo del nivel de ingreso promedio en Ecuador. Aunque la correlación no implica causalidad, la fuerte asociación entre ambas variables sugiere que el monitoreo del IPC puede proporcionar información valiosa sobre la evolución del bienestar económico. El modelo desarrollado es simple, reproducible y accesible, lo cual lo convierte en una herramienta útil para investigadores, estudiantes y tomadores de decisiones.

REFERENCIAS

- [1] C. Herrera-Oliva, J. Campos-Gaytán y F. M. Carrillo-González, “Estimación de datos faltantes de precipitación por el método de regresión lineal: Caso de estudio Cuenca Guadalupe, Baja California, México”, *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, vol. 25, no. 71, pp. 34-44, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/674/67452917005/html/>
- [2] E. Moreno Sarmiento, “Predicción con series de tiempo y regresión”, *Panorama*, vol. 2, no. 4, pp. 36-58, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3439/343929216005.pdf>

- [3] I. Rivera, Principios de macroeconomía: un enfoque de sentido común, Pontificia Universidad Católica del Perú - Fondo Editorial, 2017, pp. 135. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.pucp.edu.pe/items/19c322c4-61f1-4bdf-bd80-c0f6f99ab63b>
- [4] F. A. Manzano, “Síntesis de la demografía y la economía: el producto bruto interno (PBI) per cápita”, *Boletim Goiano de Geografia*, vol. 36, no. 1, pp. 102-124, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3371/337144713007.pdf>
- [5] M. A. Arcenales Mero, “El crecimiento económico ha influido significativamente en el comportamiento del PIB per cápita de Ecuador en los últimos cinco años”, Tesis de grado, Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí., Manta, 2024. [En línea]. Disponible en: https://rraaecedia.edu.ec/vufind/Record/ULEAM_898a030b77b7fa913136b5eeb4de9abf
- [6] J. Martínez, “El pib (per cápita) como indicador de sostenibilidad”, *boletin de estudios economicos*, vol. 65, no. 200, pp. 283-308, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://www.ehu.eus/documents/6902252/12061410/J.+Mart%C3%ADnez-El+PIB+como+indicador+de+sostenibiidad.pdf/e3a21594-7298-f9ae-28a0-02ca40c535d7>
- [7] I. González, “El Índice de Precios de Consumo. Evolución metodológica y propuestas futuras”, *Estadística Española*, vol. 60, no. 195, pp. 11-31, 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.ine.es/ss/Satellite?blobcol=urldata&blobheader=application%2Fpdf&blobheadername1=Content-Disposition&blobheadervalue1=attachment%3B+filename%3Dart_195_2.pdf&blobkey=urldata&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=680%2F842%2Fart_195_2%2C0.pdf&ssbinary=true
- [8] A. E. Pilco Córdova, “Índice de precios al consumidor y la canasta básica familiar en el Ecuador pospandemia”, *Perspectivas Sociales y Administrativas*, vol. 2, no. 2, pp. 13-24, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://perspectivas.esprint.tech/index.php/perspectivas/article/view/68>
- [9] V. M. Zúñiga Jaramillo, “Análisis de los componentes del IPC en el Ecuador a nivel nacional y regional periodo 2005 – 2014”, Tesis de grado, Universidad Particular Técnica de Loja, Loja, 2017. [En línea]. Disponible: <https://dspace.utpl.edu.ec/handle/20.500.11962/21174>.
- [10] Instituto Nacional de Estadística y Censos, “Metodología Índice de Precios al Consumidor (Base: 2014=100)”, INEC, Ecuador, 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Inflacion/2023/enero/Metodologia_IPC\(Base%202014=100\).pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Inflacion/2023/enero/Metodologia_IPC(Base%202014=100).pdf)
- [11] M. Zúñiga-González, P. Vargas-Ramirez y G. Rivas-Tejeda, “Impacto de la inflación y PIB per cápita en el gasto de consumo de los hogares de Ecuador, periodo 1990-2019”, *Dominio de la ciencias*, vol. 6, no. 4, pp. 31-45, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8638151.pdf>
- [12] S. Segovia, “20 años de dolarización de la economía ecuatoriana: análisis del sector real e indicadores sociales”, Banco Central del Ecuador, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.bce.ec/handle/32000/3222>
- [13] M. B. Castro y K. Beltrán, “Análisis correlación del crecimiento económico y la tasa de desempleo en el Ecuador (período 2012-2021)”, *Ciencia Latina Revista Científica*

Multidisciplinar, vol. 7, no. 4, pp. 4020-4035, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/7248>

- [14] L. G. Pinos Luzurriaga y J. E. Malo Ottati, “Análisis econométrico de la variación del tipo de cambio real, y como este ha afectado a la inflación del Ecuador en el periodo 2007-2017”, Tesis de grado, Universidad del Azuay, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/8865>
- [15] A. Smith, Investigación sobre la naturaleza y causas de la riqueza de las naciones, Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica, 1958. [En línea]. Disponible: <https://omegalfa.es/downloadfile.php?file=libros/la-riqueza-de-las-naciones.pdf>
- [16] R. M. Solow, “A Contribution to the Theory of Economic Growth”, *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 70, no. 1, pp. 65-94, 1956. [En línea]. Disponible en: <http://piketty.pse.ens.fr/les/Solow1956.pdf>
- [17] M. Friedman, Inflation: Causes and Consequences, Bombay: Asia Publishing House, 1963. [En línea]. Disponible en: <https://miltonfriedman.hoover.org/internal/media/dispatcher/271018/full>
- [18] D. F. Cardona Madariaga, J. L. González Rodríguez, M. Rivera Lozamo y E. H. Cárdenas Vallejo, “Aplicación de la regresión lineal en un problema de pobreza”, *Universidad del Rosario*, vol. 12, pp. 73-80, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/interaccion/article/view/2315/1767>
- [19] V. Quinde Rosales, R. Bucaram Leverone, M. Saldaña Vargas y A. Ordeñana Proaño, “Relación entre el crecimiento y el desarrollo económico: caso Ecuador”, *Universidad y Sociedad*, vol. 12, no. 3, pp. 60-66, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/1600>
- [20] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), “Índice de Precios al Consumidor”, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/indice-de-precios-al-consumidor>.
- [21] Banco Central del Ecuador, “Producto Interno Bruto per cápita,” 2024. [En línea]. Disponible en: <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/informacioneconomicaindicadores/real/PIBPerCapita.html>.



Crecimiento y concentración territorial del internet fijo en Ecuador: comparación provincial 2024-2025

(Growth and Territorial Concentration of Fixed Broadband Internet in Ecuador: A Provincial Comparison, 2024-2025)

Karen Lissette Estacio Corozo
Instituto Superior Tecnológico ARGOS, Guayaquil, Ecuador
k_estacio@tecnologicoargos.edu.ec

Resumen: Este estudio analizó la evolución territorial del internet fijo en Ecuador a escala provincial, comparando los cortes de junio de 2024 y junio de 2025 a partir de registros oficiales de ARCOTEL/SIETEL. Se aplicó un diseño cuantitativo, no experimental y de alcance descriptivo-analítico. El análisis consideró el crecimiento absoluto, el crecimiento relativo, la penetración aproximada por habitante —cuentas por cada 100 habitantes con base en el Censo de Población y Vivienda 2022— y la concentración territorial. Para ello, se trabajó con las cuentas asignables a una provincia específica, excluyendo los registros no provinciales identificados como “zonas de estudio”. Se calcularon indicadores de participación provincial, CR2, CR4, HHI, coeficiente de Gini, Entropía normalizada y Theil normalizado; además, se aplicaron pruebas no paramétricas de Wilcoxon y Spearman. Los resultados mostraron que las 24 provincias incrementaron sus cuentas de internet fijo. Sin embargo, Guayas y Pichincha mantuvieron más de la mitad del total provincial. La correlación de Spearman indicó que el tamaño inicial del mercado provincial se asoció positivamente con el incremento absoluto ($\rho = 0,743$; $p < 0,001$) y negativamente con el crecimiento relativo ($\rho = -0,521$; $p = 0,009$). Asimismo, las provincias con mayor penetración inicial tendieron a captar mayores incrementos absolutos ($\rho = 0,498$; $p = 0,013$). Se concluye que la expansión fue generalizada, pero respondió más a una difusión territorial heterogénea que a una convergencia provincial sólida.

Palabras clave: brecha digital, conectividad, internet fijo, penetración digital.

Abstract: This study analyzed the territorial evolution of fixed internet in Ecuador at the provincial level, comparing the June 2024 and June 2025 reporting periods based on official ARCOTEL/SIETEL records. A quantitative, non-experimental, descriptive-analytical design was applied. The analysis considered absolute growth, relative growth, approximate penetration per inhabitant—accounts per 100 inhabitants based on the 2022 Population and Housing Census—and territorial concentration. For this purpose, the study used accounts assignable to a specific province, excluding non-provincial records identified as “study areas.” Provincial share, CR2, CR4, HHI, Gini coefficient, normalized Entropy, and normalized Theil indicators were calculated; in addition, non-parametric Wilcoxon and Spearman tests were applied. The results showed that all 24 provinces increased their number of fixed internet accounts. However, Guayas and Pichincha continued to account for more than half of the provincial total. Spearman’s correlation indicated that the initial size of the provincial market was positively associated with absolute growth ($\rho = 0.743$; $p < 0.001$) and negatively associated with relative growth ($\rho = -0.521$; $p = 0.009$). Likewise, provinces with higher initial penetration tended to capture greater absolute increases ($\rho = 0.498$; $p = 0.013$). It is concluded that the expansion was widespread, but it reflected heterogeneous territorial diffusion rather than solid provincial convergence.

Keywords: digital divide, connectivity, fixed broadband, digital penetration.

1. INTRODUCCIÓN

En América Latina y el Caribe (ALC), las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) y la conectividad a internet han crecido de forma sostenida durante la última década; sin embargo, la expansión no ha sido homogénea y persisten brechas relevantes entre países y, sobre todo, al interior de ellos. La evidencia comparada muestra que, mientras algunas economías superan niveles muy altos de conectividad en los hogares, otras mantienen rezagos significativos, con diferencias que suelen reproducirse territorialmente [1], [2].

En este escenario, el acceso no depende únicamente de la disponibilidad tecnológica. Factores como la inversión en infraestructura, la estructura de mercado, la regulación y, especialmente, la asequibilidad del servicio condiciona la adopción efectiva. En ALC, la asequibilidad tiende a deteriorarse en hogares de menores ingresos y en zonas rurales, donde la menor densidad poblacional eleva los costos de despliegue y operación de la red [3], [4], [5].

Para monitorear el desarrollo de la banda ancha y sus brechas, una herramienta ampliamente utilizada en la región es el Índice de Desarrollo de la Banda Ancha (IDBA), que integra dimensiones de política pública, regulación, infraestructura, aplicaciones y adopción. Este enfoque es especialmente útil para comprender que la llamada “brecha digital” no es estática, puede transformarse y, en ciertos contextos, profundizarse si la expansión de la cobertura no se acompaña de condiciones de asequibilidad y calidad [6].

Con datos de 2022, el banco de desarrollo de América Latina y el Caribe (CAF) reportó que el acceso a internet en los hogares aumentó con el nivel de ingresos y fue considerablemente mayor en áreas urbanas que en rurales. En el área urbana, el acceso osciló entre 59,5 % (quintil 1) y 87,8 % (quintil 5), mientras que en el área rural se ubicó entre 21,4 % y 49,4 %. En consecuencia, se estimó que el 25,2 % de la población urbana y el 64,2 % de la población rural habitaban en hogares sin acceso a internet [3], [7]. Este patrón sugiere que el cierre de brecha exige, además de ampliar cobertura, resolver el componente económico del despliegue y de la última milla, particularmente en territorios con bajos ingresos y altos costos de conexión [8], [9].

Desde una perspectiva comparada, Ecuador registra avances, pero aún presenta rezagos frente a promedios regionales y, con mayor distancia, respecto de países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). Para 2019, un diagnóstico del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) señalaba que la penetración de banda ancha fija y móvil en Ecuador se ubicaba por debajo de referencias regionales y significativamente por debajo de la OCDE, además de una cobertura menor de banda ancha móvil de alta velocidad [6], [10]. Las estadísticas oficiales muestran una expansión significativa del acceso a internet en los hogares. Entre 2019 y 2024, el porcentaje de hogares con acceso a internet en el área urbana pasó de 56,1 % a 73,6 %, mientras que en el área rural aumentó de 21,6 % a 48,1 % [11].

Pese al mayor crecimiento relativo en el ámbito rural, la brecha urbano-rural persiste. En estas zonas, la expansión del acceso está condicionada por la inversión en infraestructura, los costos de la última milla y la capacidad de los hogares para sostener el pago del servicio. Adicionalmente, la disponibilidad de banda ancha puede favorecer procesos de diversificación productiva y reducción de pobreza cuando se combina con capacidades y usos relevantes para el tejido local [12].

A esto se suma que el cierre de brecha no se agota en el acceso físico. Evidencia reciente para Ecuador identifica una asociación positiva entre alfabetización digital/adopción digital y niveles de ingreso, lo cual respalda la necesidad de políticas complementarias de capacidades para convertir conectividad en resultados económicos y sociales [13]. En el marco de la planificación pública, el Plan de Desarrollo para el Nuevo Ecuador 2024-2025, en su Objetivo Nacional 8, plantea “impulsar la conectividad como fuente de desarrollo y crecimiento económico y sostenible”, priorizando el despliegue de fibra óptica en zonas rurales, urbano-marginales y de frontera, así como la transición hacia redes más avanzadas y el acceso al espectro radioeléctrico en condiciones adecuadas [14].

En este contexto, el objetivo del estudio fue determinar si el crecimiento provincial de accesos de internet fijo entre junio de 2024 y junio de 2025 representó un cierre territorial de la brecha o una expansión heterogénea concentrada. Para ello, se integraron indicadores absolutos, relativos, per cápita y de concentración territorial, junto con pruebas no paramétricas orientadas a evaluar la relación entre tamaño inicial, penetración demográfica y patrones de crecimiento.

2. METODOLOGÍA

Se desarrolló un estudio con enfoque cuantitativo, diseño no experimental y alcance descriptivo-analítico. La fuente principal fueron los archivos oficiales de ARCOTEL/SIETEL denominados “Cuentas del Servicio de Acceso a Internet Fijo y Móvil”, con fechas de corte de junio de 2024 y junio de 2025 [15]. En ambos archivos se identificó la sección de distribución provincial de accesos de internet fijo. Para garantizar trazabilidad, se excluyeron dos tipos de registros que no correspondían al universo provincial del estudio: a) “Operadoras Móviles”, porque pertenecen al Servicio Móvil Avanzado (SMA); y b) “Zonas de estudio”, porque contiene accesos no asignables a una provincia específica. Esta decisión dejó un universo provincial de 2.999.777 accesos en junio de 2024 y 3.269.208 accesos en junio de 2025. Los totales oficiales nacionales publicados por ARCOTEL fueron 2.999.878 y 3.269.512, respectivamente; la diferencia correspondió a los registros no provinciales de “zonas de estudio” (101 en 2024 y 304 en 2025) [15].

Como denominador demográfico, se incorporó la población provincial del Censo de Población y Vivienda (CPV) 2022 [16]. Este denominador permitió calcular una tasa comparable de accesos de internet fijo por cada 100 habitantes. La tasa se utilizó como indicador aproximado de penetración territorial y no como sustituto de la penetración por hogar. Para la contextualización nacional, se consideró además que la penetración del internet fijo por hogar alcanzó 60,26% a diciembre de 2024, según reportes sectoriales oficiales [17].

La base de datos fue descargada en formato .xlsx, depurada y validada en Excel; posteriormente, se procesó en IBM SPSS Statistics. En la fase de preparación se estandarizaron los nombres de provincias, se verificó la consistencia temporal y se controlaron valores atípicos evidentes. La estructura final de la base contempló las variables de mes, provincia y accesos de internet fijo. La Figura 1 resume la secuencia analítica aplicada.

Figura 1. Secuencia analítica aplicada al estudio.



Para el análisis se definió $X_{i,t}$ como el número de accesos de internet fijo de la provincia i en el corte t ; N_i como la población provincial del CPV 2022; X_t como el total provincial de accesos; $s_{i,t}$ como la participación provincial; $n = 24$ como número de provincias; y $\bar{x}_t$ como el promedio provincial de accesos. Las expresiones empleadas en el análisis se presentan a continuación (Ecuación 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10).

Incremento absoluto

$$\Delta x_i = x_{i,2025} - x_{i,2024} \quad (1)$$

Crecimiento relativo porcentual

$$g_i = \left(\frac{x_{i,2025} - x_{i,2024}}{x_{i,2024}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Penetración demográfica aproximada

$$P_{i,t} = \left(\frac{x_{i,t}}{N_i} \right) \times 100 \quad (3)$$

Participación provincial y total provincial

$$s_{i,t} = \frac{x_{i,t}}{X_t}, \quad X_t = \sum_{i=1}^n x_{i,t} \quad (4)$$

Razón de concentración CR2 y CR4

$$C_{k,t} = \sum_{i=1}^k s_{(i),t}, \quad k \in \{2,4\} \quad (5)$$

Índice de Herfindahl-Hirschman

$$I_{H,t} = \sum_{i=1}^n (100 s_{i,t})^2 \quad (6)$$

Coefficiente de Gini

$$G_t = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |x_{i,t} - x_{j,t}|}{2n^2 \bar{x}_t} \quad (7)$$

Entropía de Shannon normalizada

$$H_t^N = \frac{-\sum_{i=1}^n s_{i,t} \ln(s_{i,t})}{\ln(n)} \quad (8)$$

Índice de Theil normalizado

$$T_t^N = \frac{\sum_{i=1}^n s_{i,t} \ln\left(\frac{s_{i,t}}{1/n}\right)}{\ln(n)} \quad (9)$$

Variación de la penetración demográfica aproximada

$$\Delta P_i = P_{i,2025} - P_{i,2024} \quad (10)$$

CR2 y CR4 permitieron estimar la proporción del total provincial explicada por las provincias con mayor concentración de accesos; el HHI resumió la concentración estructural considerando la participación de todas las provincias; y el coeficiente de Gini midió la desigualdad de la distribución provincial. La entropía normalizada evaluó el grado de dispersión territorial, mientras que el Theil normalizado estimó la distancia de la distribución observada respecto de una distribución uniforme. En estos dos últimos casos, la normalización con $\ln(n)$ permitió obtener valores comparables entre 0 y 1 [19]-[27].

Con el fin de fortalecer la interpretación más allá de la comparación descriptiva, se aplicó la prueba de rangos con signo de Wilcoxon para contrastar si los accesos provinciales de junio de 2025 fueron

sistemáticamente superiores a los de junio de 2024. Además, se estimaron correlaciones de Spearman entre cinco pares de variables: a) tamaño inicial del mercado provincial e incremento absoluto; b) tamaño inicial y crecimiento relativo; c) penetración inicial e incremento absoluto; d) penetración inicial y crecimiento relativo; y e) penetración inicial y variación de la penetración. En todos los contrastes se adoptó un nivel de significancia de 0,05 [28].

En cuanto a las consideraciones éticas el estudio utilizó bases agregadas, públicas y oficiales. No se emplearon datos personales, identificadores individuales ni información sensible. Por tanto, el análisis no implicó intervención con participantes humanos ni requirió consentimiento informado.

3. RESULTADOS

3.1 Crecimiento provincial y penetración demográfica

La delimitación del universo provincial permitió trabajar con una base homogénea para ambos cortes temporales. El total analizado ascendió a 2.999.777 accesos en junio de 2024 y a 3.269.208 en junio de 2025. La diferencia frente al total nacional oficial se explicó por registros no asignables a una provincia específica, clasificados por la fuente como “zonas de estudio”. De este modo, los resultados se interpretaron sobre el conjunto de accesos provinciales comparables.

Tabla 1. Crecimiento interanual y penetración demográfica del internet fijo por provincia.

Provincia	Población 2022	Accesos jun-24	Accesos jun-25	Incremento	% crec.	Accesos/100 hab. jun-25
Azuay	801.609	173.527	190.801	17.274	9,95%	23,80
Bolívar	199.078	20.496	23.144	2.648	12,92%	11,63
Cañar	227.578	40.906	46.930	6.024	14,73%	20,62
Carchi	172.828	26.421	28.517	2.096	7,93%	16,50
Chimborazo	471.933	75.447	81.302	5.855	7,76%	17,23
Cotopaxi	470.210	47.984	55.029	7.045	14,68%	11,70
El Oro	714.592	94.568	104.846	10.278	10,87%	14,67
Esmeraldas	553.900	59.682	72.346	12.664	21,22%	13,06
Galápagos	28.583	3.730	7.327	3.597	96,43%	25,63
Guayas	4.391.923	856.327	915.817	59.490	6,95%	20,85
Imbabura	469.879	82.379	88.520	6.141	7,45%	18,84
Loja	485.421	83.235	94.722	11.487	13,80%	19,51
Los Ríos	898.652	76.715	87.144	10.429	13,59%	9,70
Manabí	1.592.840	189.725	211.474	21.749	11,46%	13,28
Morona Santiago	192.508	16.795	17.467	672	4,00%	9,07
Napo	131.675	13.283	15.874	2.591	19,51%	12,06
Orellana	182.166	16.054	18.056	2.002	12,47%	9,91
Pastaza	111.915	11.840	13.829	1.989	16,80%	12,36
Pichincha	3.089.473	834.284	895.472	61.188	7,33%	28,98
Santa Elena	385.735	59.833	67.402	7.569	12,65%	17,47
Santo Domingo de los Tsáchilas	492.969	80.802	92.337	11.535	14,28%	18,73
Sucumbíos	199.014	16.116	17.555	1.439	8,93%	8,82
Tungurahua	563.532	105.832	107.646	1.814	1,71%	19,10
Zamora Chinchipe	110.973	13.796	15.651	1.855	13,45%	14,10

Fuente: elaboración propia a partir de ARCOTEL/SIETEL [15] e INEC-CPV 2022 [16], [18]. Nota: se excluyeron “zonas de estudio” por no ser asignables a una provincia.

Las 24 provincias registraron crecimiento interanual (Tabla 1). En términos absolutos, los mayores aumentos se observaron en Pichincha (+61.188), Guayas (+59.490), Manabí (+21.749), Azuay (+17.274), Esmeraldas (+12.664), Santo Domingo de los Tsáchilas (+11.535) y Loja (+11.487). En términos relativos, los mayores crecimientos correspondieron a las Galápagos (+96,43 %), Esmeraldas (+21,22 %), Napo (+19,51 %) y Pastaza (+16,80 %). La comparación entre ambas medidas mostró que los territorios con bases pequeñas tendieron a amplificar porcentualmente incrementos absolutos moderados.

La medición por cada 100 habitantes permitió distinguir con mayor precisión la posición territorial de cada provincia. Pichincha pasó de 27,00 a 28,98 accesos por cada 100 habitantes, mientras que Guayas aumentó de 19,50 a 20,85. Galápagos, pese a registrar un menor volumen absoluto de accesos, alcanzó 25,63 accesos por cada 100 habitantes en 2025, lo que evidenció un avance relevante en términos demográficos. En contraste, Sucumbíos, Orellana, Morona Santiago y Los Ríos se mantuvieron en niveles inferiores o cercanos a 10 accesos por cada 100 habitantes, aun cuando varias de estas provincias presentaron variaciones porcentuales positivas. Este resultado confirmó que el crecimiento relativo no necesariamente implicó una mejora equivalente en la penetración territorial del servicio.

3.2 Contrastes no paramétricos

La prueba de Wilcoxon indicó que los accesos provinciales de junio de 2025 fueron sistemáticamente superiores a los de junio de 2024 ($V = 300$; $p < 0,001$). Este resultado confirmó que el crecimiento no se concentró exclusivamente en pocos territorios, sino que constituyó una pauta general en el conjunto provincial (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados del análisis inferencial complementario.

Prueba	Estadístico	p-valor	Interpretación
Wilcoxon: jun-25 > jun-24	$V = 300$	$< 0,001$	Crecimiento provincial generalizado.
Spearman: tamaño inicial vs. incremento absoluto	$\rho = 0,743$	$< 0,001$	Mayor base inicial, mayor incremento absoluto.
Spearman: tamaño inicial vs. % crecimiento	$\rho = -0,521$	$0,009$	Mayor crecimiento relativo en provincias con menor base inicial.
Spearman: penetración inicial vs. incremento absoluto	$\rho = 0,498$	$0,013$	Mayor penetración inicial, mayor incremento absoluto.
Spearman: penetración inicial vs. % crecimiento	$\rho = -0,330$	$0,115$	Relación negativa no significativa.
Spearman: penetración inicial vs. Δ penetración	$\rho = 0,374$	$0,072$	Relación positiva no significativa.

Fuente: elaboración propia a partir de los valores provinciales de junio de 2024 y junio de 2025 procesados en SPSS.

La correlación de Spearman entre tamaño inicial del mercado provincial e incremento absoluto fue positiva y significativa ($\rho = 0,743$; $p < 0,001$). En contraste, la relación entre tamaño inicial y crecimiento relativo fue negativa y significativa ($\rho = -0,521$; $p = 0,009$). En términos sustantivos, las provincias con mayor base inicial captaron más accesos nuevos, mientras que las provincias más pequeñas registraron tasas porcentuales más elevadas debido al efecto de base.

La incorporación de la penetración demográfica permitió matizar la interpretación del crecimiento. La asociación entre penetración inicial e incremento absoluto fue positiva y significativa ($\rho = 0,498$; $p = 0,013$), lo que indica que las provincias con más cuentas por habitante al inicio también tendieron a captar mayores aumentos absolutos. En cambio, la relación entre penetración inicial y crecimiento relativo fue

negativa, pero no significativa ($\rho = -0,330$; $p = 0,115$), y la asociación entre penetración inicial y variación de penetración tampoco alcanzó significancia estadística ($\rho = 0,374$; $p = 0,072$).

3.3 Concentración territorial del servicio

El análisis complementario de concentración para junio confirmó que la estructura espacial del servicio continuó siendo marcadamente asimétrica (Tabla 3). En 2024, Guayas y Pichincha concentraron conjuntamente el 56,49 % de los accesos nacionales (CR2), mientras que las cuatro provincias con mayor participación acumularon el 68,60 % (CR4). En 2025, estos indicadores descendieron ligeramente a 55,40 % y 67,71 %, respectivamente.

En la misma dirección, el HHI pasó de 1.741,23 a 1.685,93 y el coeficiente de Gini de 0,657 a 0,647. Aunque estos cambios sugirieron una leve desconcentración, la magnitud del descenso fue reducida y no modificó el rasgo central del mercado provincial: más de la mitad de los accesos de internet fijo continuó concentrada en dos provincias.

La incorporación de los índices de entropía y Theil confirmó los resultados obtenidos mediante CR2, CR4, HHI y Gini. La entropía normalizada aumentó de 0,718 en junio de 2024 a 0,727 en junio de 2025, lo que indicó una distribución ligeramente más dispersa de los accesos de internet fijo entre provincias. El índice de Theil normalizado disminuyó de 0,282 a 0,273, reflejando una leve reducción de la desigualdad territorial respecto de una distribución provincial uniforme. Sin embargo, la magnitud de estos cambios fue reducida, por lo que los resultados no evidenciaron una desconcentración estructural del servicio.

Tabla 3. Indicadores de concentración territorial del internet fijo.

Indicador	2024	2025	Descripción
CR2	56,49%	55,40%	Guayas y Pichincha concentraron más de la mitad de los accesos nacionales.
CR4	68,60%	67,71%	Las cuatro principales provincias concentraron cerca de dos tercios del total.
HHI	1.741,23	1.685,93	Se observó un leve descenso, aunque dentro de una estructura aún concentrada.
Gini	0,657	0,647	La desigualdad territorial disminuyó solo marginalmente.
H ^N	0,718	0,727	La dispersión territorial aumentó levemente.
T ^N	0,282	0,273	La desigualdad territorial se redujo de forma marginal.

Fuente: elaboración propia con base en la distribución provincial de accesos de internet fijo reportados por ARCOTEL/SIETEL [15].

4. DISCUSIÓN

El principal hallazgo del estudio fue que la expansión del internet fijo en Ecuador entre junio de 2024 y junio de 2025 ocurrió junto con una persistente concentración territorial. Todas las provincias aumentaron sus accesos, pero los incrementos absolutos fueron mayores en los territorios que ya partían de bases más amplias y, en varios casos, de niveles superiores de penetración demográfica. Por ello, el crecimiento agregado del servicio no constituyó, por sí solo, evidencia de convergencia territorial.

La tasa de accesos por cada 100 habitantes complementó la lectura basada en magnitudes absolutas. Guayas y Pichincha mantuvieron posiciones dominantes por su concentración poblacional, económica e infraestructural, pero la medición per cápita reveló diferencias que el conteo de accesos no permite observar de forma directa. Galápagos destacó por su avance relativo y per cápita, mientras que varias provincias

amazónicas y costeras conservaron niveles bajos de penetración. Este contraste mostró que el crecimiento porcentual pudo coexistir con rezagos persistentes en términos de acceso proporcional.

Los resultados son consistentes con la literatura sobre difusión de banda ancha. El despliegue de infraestructura fija suele intensificarse en territorios con economías de escala, mayor densidad poblacional, demanda empresarial y menores costos medios por conexión [3], [8], [12]. En territorios rurales, dispersos o de geografía compleja, la última milla implica costos más altos y retornos privados más lentos. En consecuencia, el cierre de brechas requiere intervenciones complementarias cuando la expansión depende principalmente de señales de mercado.

El papel del Servicio Móvil Avanzado (SMA) resulta relevante para interpretar estos resultados. ARCOTEL reportó 11.496.167 líneas móviles con acceso a datos en junio de 2024 y 11.889.931 en junio de 2025, frente a 2.999.878 y 3.269.512 suscriptores de internet fijo en los mismos cortes. Esta diferencia de escala sugiere que, en determinados hogares y territorios, la conectividad móvil puede operar como alternativa práctica frente a la instalación domiciliaria. Sin embargo, el SMA no sustituye plenamente las capacidades del internet fijo para usos intensivos como educación en línea, teletrabajo, productividad empresarial, trámites digitales o consumo simultáneo dentro del hogar.

Desde la perspectiva de política pública, los hallazgos respaldan una estrategia territorial diferenciada. En provincias consolidadas, las prioridades se orientan hacia calidad, competencia, velocidad efectiva, resiliencia de red y actualización tecnológica. En provincias de baja penetración, la prioridad continúa siendo la expansión de infraestructura, los mecanismos de asequibilidad, los incentivos para la última milla, la conectividad comunitaria y la alfabetización digital. El dato nacional de 60,26 % de penetración por hogar a diciembre de 2024 evidencia un avance sectorial relevante, pero el análisis provincial muestra que el promedio nacional puede ocultar desigualdades territoriales [25].

Los resultados de entropía y Theil confirmaron que entre 2024 y 2025 hubo una leve desconcentración territorial del internet fijo. El incremento de la entropía normalizada indicó que los accesos se distribuyeron de manera ligeramente más amplia entre las provincias, mientras que la reducción del índice de Theil apuntó a una disminución marginal de la desigualdad territorial. Sin embargo, este cambio no fue suficiente para modificar la estructura principal del servicio, ya que Guayas y Pichincha continuaron concentrando más de la mitad de los accesos provinciales. Por tanto, la expansión observada reflejó una mayor difusión territorial del internet fijo, pero todavía no permitió hablar de una convergencia provincial sólida.

La contribución del estudio radica en proponer una lectura integrada del crecimiento territorial del internet fijo. Al diferenciar crecimiento absoluto, crecimiento relativo, penetración demográfica y concentración espacial, el análisis evita atribuir convergencia a incrementos agregados que pueden seguir concentrados en provincias líderes, o sobredimensionar tasas porcentuales elevadas en territorios con bases iniciales reducidas.

El estudio presenta algunas limitaciones. La tasa de accesos por cada 100 habitantes se calculó con la población provincial del CPV 2022, por lo que debe interpretarse como una variable aproximada o sustituta de penetración territorial. Esta decisión metodológica permitió comparar provincias con un denominador oficial común, pero no incorporó los cambios demográficos ocurridos entre 2022, 2024 y 2025. En consecuencia, la métrica pudo sobreestimar o subestimar parcialmente la penetración en provincias con mayor crecimiento poblacional, migración interna, cambios en la composición de hogares o variaciones en la densidad territorial. Se sugiere que en futuras investigaciones se incorporen proyecciones provinciales anuales, número de hogares por provincia y variables de ruralidad para estimar con mayor precisión la penetración residencial. Además, no se analizaron velocidad, calidad del servicio, precios, ingreso de los hogares, competencia por operador ni tecnología de acceso. La incorporación de estas variables permitiría modelar con mayor profundidad los determinantes de adopción y brecha digital.

5. CONCLUSIONES

El análisis provincial permitió confirmar que los accesos de internet fijo aumentaron en las 24 provincias entre junio de 2024 y junio de 2025. No obstante, este crecimiento no implicó una reducción

importante de la concentración territorial, ya que Guayas y Pichincha continuaron reuniendo más de la mitad del total provincial.

Los resultados inferenciales también mostraron que el crecimiento no se distribuyó de manera uniforme. Las provincias que ya tenían un mayor número de accesos en 2024 fueron las que incorporaron más accesos nuevos en términos absolutos. En cambio, las provincias con bases más pequeñas presentaron mayores porcentajes de crecimiento, lo que respondió en parte al efecto de partir de volúmenes iniciales reducidos. Además, al analizar los accesos por cada 100 habitantes, se observó que las provincias con mayor penetración inicial también tendieron a captar mayores incrementos absolutos. En conjunto, estos hallazgos sugirieron que la expansión del internet fijo avanzó de forma territorialmente desigual, más cercana a una difusión heterogénea que a una convergencia provincial consolidada.

Los indicadores de concentración y desigualdad territorial respaldaron esta interpretación. El CR2, CR4, HHI y coeficiente de Gini disminuyeron ligeramente. De forma complementaria, la entropía normalizada aumentó de 0,718 a 0,727, mientras que el índice de Theil normalizado bajó de 0,282 a 0,273. Estos cambios indicaron una distribución algo más amplia de los accesos entre provincias y una leve reducción de la desigualdad territorial. Sin embargo, la variación fue limitada y no alteró el peso dominante de las provincias líderes.

Desde una perspectiva de política pública, estos resultados muestran que el cierre de brechas de conectividad no debe evaluarse únicamente por el aumento del número total de accesos. También es necesario considerar la penetración territorial, la asequibilidad, la calidad del servicio, la cobertura efectiva, la tecnología disponible y el papel de la conectividad móvil como complemento o sustituto del internet fijo.

REFERENCIAS

- [1] I. Álvarez, C. Quirós, R. Marín, L. Medina y A. Biurrun, *Desigualdad digital en Iberoamérica. Retos en una sociedad conectada*, Documentos de Trabajo, n.º 50, Madrid, España: Fundación Carolina, jun. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.33960/issn-e.1885-9119.DT50>
- [2] A. Caragliu y C. F. Del Bo, “Smart cities and the urban digital divide”, *Smart cities and the urban digital divide*, vol. 3, no. 1, jul. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s42949-023-00117-w>
- [3] M. Agudelo, E. Chomali y L. Torres, “Hacia el cierre de la brecha digital. Modelos innovadores de financiamiento y factores de éxito en la estructuración de proyectos”, BANCO DE DESARROLLO DE AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE - CAF, 2024. Accedido: 27 feb. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/2272>
- [4] UNESCO, “Sociedad digital: brechas y retos para la inclusión digital en América Latina y el Caribe”, 2017. Accedido: 5 jun. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000262860>.
- [5] I. Ruiz-Martínez y J. Esparcia, “Internet access in rural areas: brake or stimulus as Post-Covid-19 opportunity?”, *Sustainability*, vol. 12, no. 22, nov. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su12229619>
- [6] C. Rivera Zapata, E. Iglesias Rodríguez y A. García Zaballos, “Estado actual de las telecomunicaciones y la banda ancha en Ecuador”, Inter-American Development Bank, feb. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.18235/0002200>
- [7] Fundación Carolina y Telefónica S. A., “La transición digital: retos y oportunidades para Iberoamérica”, 2021. Accedido: 21 feb. 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.fundacioncarolina.es/wp-content/uploads/2021/12/La_transicion_digital.pdf.
- [8] The World Bank, “Digital economy for Latin America and the Caribbean country diagnostic: Ecuador”, 2024. Accedido: 27 feb. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099957201262484042/pdf/IDU148619f7c191381405618db3115106df826f9.pdf>.

- [9] M. V. Alderete, “Adopción de banda ancha en los países latinoamericanos: ¿importa la proximidad geográfica?”, *Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía*, vol. 50, no. 198, may. 2019. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2019.198.67411>
- [10] Z. Bánhidi, “The impact of broadband networks on growth and development in South America”, *Periodica Polytechnica Social and Management Sciences*, vol. 29, no. 1, pp. 33-39, sep. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3311/PPso.14905>
- [11] INEC, “Tecnologías de la información y comunicación-TIC”, 2024. Accedido: 22 feb. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/tecnologias-de-la-informacion-y-comunicacion-tic/>
- [12] H. Galperin, R. Katz y R. Valencia, “The impact of broadband on poverty reduction in rural Ecuador”, *Telematics and Informatics*, vol. 75, p. 101905, dic. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tele.2022.101905>
- [13] C. Uzátégui-Sánchez, D. Zaldumbide-Peralvo y M. J. Pérez-Espinoza, “The impact of digital literacy on income growth among Ecuadorian workers”, *Portal de la Ciencia*, vol. 6, no. 1, pp. 81-94, ene. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.51247/pdlc.v6i1.457>
- [14] Secretaría Nacional de Administración Pública y Planificación, “Plan de Desarrollo para el Nuevo Ecuador 2024-2025”, 2024. Accedido: 22 feb. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://planificacion.presidencia.gob.ec/plan-de-desarrollo-para-el-nuevo-ecuador-2024-2025/>.
- [15] ARCOTEL, “Abonados y usuarios: cuentas del servicio de acceso a internet fijo y móvil, junio de 2024 y junio de 2025”. [En línea]. Accedido: 5 feb. 2026. Disponible en: <https://www.arcotel.gob.ec/abonados-y-usuarios/>.
- [16] INEC, “Censo de Población y Vivienda 2022: población y densidad poblacional por provincia”, 2022. Accedido: 2 abr. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>.
- [17] Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información, “Informe de Rendición de Cuentas periodo 2024”, 2025. Accedido: 22 feb. 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2025/08/INFORME-FINAL-RENDICION-DE-CUENTAS_2024-FIRMADO.pdf.
- [18] Ministry of Manpower, Singapore, “Absolute vs relative change concepts and definitions”. [En línea]. Accedido: 5 jun. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://stats.mom.gov.sg/SL/Pages/Absolute-vs-Relative-Change-Concepts-and-Definitions.aspx>
- [19] OECD, “Methodologies to measure market competition”, OECD Competition Law and Policy Working Papers, no. 253, jun. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1787/29bf31c1-en>
- [20] The World Bank, “Gini index: metadata glossary”. Accedido: 2 mar. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://databank.worldbank.org/metadataglossary/gender-statistics/series/SI.POV.GINI>.
- [21] D. Panzera, A. Cartone y P. Postiglione, “New evidence on measuring the geographical concentration of economic activities”, *Papers in Regional Science*, vol. 101, no. 1, pp. 59-79, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/pirs.12644>
- [22] B. Purvis, Y. Mao y D. Robinson, “Entropy and its application to urban systems”, *Entropy*, vol. 21, no. 1, p. 56, ene. 2019. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/e21010056>
- [23] D. A. Griffith, Y. Chun y J. Hauke, “A Moran eigenvector spatial filtering specification of entropy measures”, *Papers in Regional Science*, vol. 101, no. 1, pp. 259-280, feb. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/pirs.12646>
- [24] C. E. Shannon, “A mathematical theory of communication”, *Bell System Technical Journal*, vol. 27, no. 4, pp. 623-656, oct. 1948. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x>

- [25] F. J. Goerlich, “Desigualdad, diversidad y convergencia: (algunos) instrumentos de medida”, 1ª ed. Instituto Valenciano de Investigaciones Económicas, 1998. Accedido: 2 abr. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.ivie.es/downloads/docs/mono/mono1998-01.pdf>.
- [26] R. M. Sánchez-Torres, “Desigualdad del ingreso en Colombia: un estudio por departamentos”, *Cuadernos de Economía*, vol. 36, no. 72, pp. 139-178, oct. 2017. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.15446/cuad.econ.v36n72.65880>
- [27] J. Haughton y S. R. Khandker, “Handbook on Poverty and Inequality”. Washington, DC: World Bank, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1596/978-0-8213-7613-3>
- [28] S. Siegel y N. J. Castellan Jr., *Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1988. [En línea]. Disponible en: https://paulyecologia.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/11/estadisticas_no_parametricas-siegel5b15d-1.pdf



PV Integration and Emission Offsets in a Campus Data Center: Evidence from Seven Years of Operation

(Integración fotovoltaica y compensación de emisiones en un centro de datos universitario: evidencia de siete años de operación)

Danny Ochoa-Correa, Emilia Sempértegui-Moscoso
Universidad de Cuenca, Ecuador.
danny.ochoac@ucuenca.edu.ec, emilia.sempertegui96@ucuenca.edu.ec

Abstract: Data centers raise energy and environmental challenges for public and educational institutions. This paper evaluates an institutional data center at the University of Cuenca (Ecuador) supplied in part by a 35 kWp rooftop photovoltaic (PV) system operating without electrical storage since 2018. Seven years of data (2018–2024) were analyzed, including monthly records of electricity consumption, PV generation, and meteorological variables. Renewable-integration indicators are computed (demand coverage and on-site use of PV energy), and avoided CO₂ emissions are estimated using official annual grid factors for Ecuador's national power system, including a sensitivity case for higher carbon intensity. Annual PV generation ranged from 24.3 to 47.3 MWh (34.4 MWh average), while annual data center consumption increased from 63.0 MWh (2018) to 149.3 MWh (2024), with a step change starting in 2020. PV coverage at the shared distribution panel (laboratory + data center) declined from 52.8% (2018) to 23.4% (2023) and 15.6% (2024), driven mainly by demand growth; in 2024, PV output was further reduced by grid outages because anti-islanding protection disconnects a grid-tied, battery-less system. Over 2018–2024, avoided emissions are estimated at 64.9–72.1 tCO₂ using national emission factors (0.27–0.30 kg CO₂/kWh), and 96.2 tCO₂ under a 0.40 kg CO₂/kWh scenario. The results support the *green data center* agenda by informing planning decisions for integrating on-site renewable generation in data centers, with emphasis on finer submetering, energy storage, and PV capacity expansion as digital workloads grow.

Keywords: green-data centers, photovoltaic energy, self-consumption, CO₂ emissions, renewable integration.

Resumen: Los centros de datos plantean retos energéticos y ambientales en instituciones públicas y educativas. Este trabajo evalúa un centro de datos institucional de la Universidad de Cuenca (Ecuador), asistido por un sistema fotovoltaico (FV) en azotea de 35 kWp, sin almacenamiento, en operación desde 2018. Se analizaron siete años de datos (2018–2024), con registros mensuales de consumo eléctrico, generación FV y variables meteorológicas. Se estimaron indicadores de integración renovable y las emisiones de CO₂ evitadas mediante factores oficiales del sistema eléctrico nacional, incluyendo un análisis de sensibilidad para un escenario de mayor intensidad de carbono. La generación FV anual varió entre 24,3 y 47,3 MWh (promedio 34,4 MWh), mientras que el consumo anual del centro de datos aumentó de 63,0 MWh (2018) a 149,3 MWh (2024), con un cambio de nivel a partir de 2020. La cobertura FV del consumo compartido (laboratorio + centro de datos) disminuyó de 52,8 % (2018) a 23,4 % (2023) y 15,6 % (2024), principalmente por el crecimiento de la demanda; en 2024, además, la generación FV se redujo por desconexiones durante cortes programados de red. En el periodo 2018–2024 se estimaron 64,9–72,1 tCO₂ evitadas con factores nacionales (0,27–0,30 kg CO₂/kWh), y 96,2 tCO₂ bajo un escenario de 0,40 kg CO₂/kWh. El estudio aporta insumos cuantitativos para la agenda de *green data centers* y respalda decisiones de planificación orientadas a incorporar

generación renovable en centros de datos, con énfasis en submedición, almacenamiento e incremento de capacidad FV conforme crecen las cargas digitales.

Palabras clave: centros de datos sostenibles, energía fotovoltaica, autoconsumo, emisiones de CO₂, integración renovable.

1. INTRODUCTION

Data centers account for a growing share of electricity demand as digital services, cloud computing, and data storage expand. Although server power management and facility thermal design have improved over time, total consumption may still increase when computational capacity and service availability grow faster than efficiency gains. Sustainability assessments extend beyond electricity use to include cooling-related water consumption and electronic waste streams [1], [2]. These issues are relevant for university data centers, where infrastructure modernization is often shaped by budgetary and operational constraints while service demand continues to grow [3], [4]. In this context, the notion of *green data centers* has shifted from a broad aspiration to a set of design and operational practices tied to measurable sustainability objectives. Recent frameworks emphasize energy efficiency together with coordinated management of supporting resources and operational decisions (e.g., virtualization and consolidation policies, cooling strategies, and continuous energy monitoring) to reduce overall environmental impacts [1]. For medium-scale facilities, a recurring theme is that renewable integration alone is insufficient unless it is paired with instrumentation and data services that make energy use, thermal conditions, and workload behavior jointly observable and usable for operational control [5], [6].

Photovoltaic (PV)-assisted data centers are feasible in regions with adequate solar resources, given the modularity of PV deployment and the opportunity to increase on-site self-consumption. However, solar generation is variable, whereas computing services and cooling requirements are continuous and often time-sensitive. Prior research has therefore emphasized integrated monitoring and cyber-physical management architectures that combine PV production, weather conditions, subsystem power measurements (information technology (IT) equipment and cooling), and workload descriptors—including container-level visibility—to support operational decision-making [5], [6]. The literature also examines algorithmic approaches to reduce grid electricity use and carbon emissions through workload shifting and demand-response participation. Deep reinforcement learning has been proposed as a controller to coordinate workload scheduling and cooling under stochastic conditions and onsite renewables [7], while hierarchical load models that capture coupled electrical–thermal–performance behavior have been introduced to improve demand-response quality without driving inefficient operating points [8]. Despite this progress, deployment in production environments remains limited; recent reviews report that overly complex frameworks, broken abstraction layers, narrow reliance on batch workloads, and weak incentives continue to slow adoption in operational settings [9].

This study provides empirical evidence in this area by analyzing an operational institutional data center at the University of Cuenca, Ecuador, partially supplied by a 35 kWp rooftop PV system directly connected to the internal distribution panel. The facility has operated continuously since 2018, enabling a longitudinal assessment over a seven-year observation window (2018–2024). We characterize the temporal evolution of electricity consumption and PV generation, quantify the renewable contribution to the facility energy balance, and estimate the associated reduction in carbon emissions due to displacement of grid electricity. By focusing on an educational, medium-scale installation in Latin America, the work complements prior conceptual and algorithmic studies with measured, long-term performance evidence to inform planning and replication in similar public sector settings [1], [3], [5].

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Infrastructure description

The data center analyzed in this study is located at the University of Cuenca (Cuenca, Ecuador) and has operated continuously since 2018, supporting institutional computing services, virtualized workloads, storage, and internal academic platforms. The facility is partially supplied by a rooftop photovoltaic (PV) plant with an installed capacity of 35 kWp, installed on the main building [10]. The PV installation comprises both polycrystalline and monocrystalline silicon modules. Most of the PV arrays are mounted in fixed structures with a tilt angle of 5° and a north-facing orientation, which is a common configuration for maximizing solar energy capture under local conditions in the southern hemisphere. The PV system is connected directly to the internal low-voltage distribution panel and operates without electrical storage (battery-less configuration); therefore, its contribution depends on real-time irradiance conditions.

The information technology (IT) room follows a rack-based architecture. According to the as-built layout, the installation comprises eight racks with a rated capacity of 5 kW per rack, arranged in four pairs to support operational organization and cable and airflow management. Thermal control is provided by four precision air-conditioning (A/C) units (Air Conditioner–B1), each rated at 21 kW of electrical power and equipped with electric heating and humidification. These units maintain the indoor environmental conditions required for reliable IT operation and provide redundancy at the cooling-system level. Table 1 summarizes the nameplate electrical capacities used in this work to characterize the infrastructure.

Table 1. Installed electrical capacity of the main subsystems in the Microgrid Laboratory (LMR) data center (nameplate values).

Subsystem	Qty	Unit (kW)	Total (kW)	Notes
IT racks (servers, storage, networking)	8	5	40	Racks arranged in four pairs
Precision A/C (Air Conditioner– B1)	4	21	84	Includes electric heating and humidifier
Total (IT + cooling)	-	-	124	Excludes auxiliaries (uninterruptible power supply (UPS) losses, lighting, etc.)

The values reported in Table 1 represent nameplate ratings (design capacities), not continuous operating demand. In practice, the instantaneous IT power depends on server utilization and the equipment population within each rack, while cooling demand varies with indoor and outdoor conditions and the control strategy of the A/C units (e.g., compressor cycling or modulation). In addition, redundancy policies may keep one or more units in standby or operating below their maximum rating. As a result, the measured electrical demand of the facility can be lower than the sum of nameplate ratings during normal operation.

To document the physical arrangement and support interpretation of the energy measurements, this section includes: (i) photographic evidence of the data center room and the rooftop PV installation (Figure 1 and Figure 2); (ii) a schematic representation of the internal composition of the data center (IT racks and cooling subsystems) used as a reference model for the energy balance discussion (Figure 3); and (iii) the single-line diagram of the electrical layout of the studied installation (Figure 4), which summarizes the net-balance operating principle. Under normal grid availability, the data center and the remaining laboratory loads draw

electricity from the distribution network and are supplemented in real time by the on-site PV production at the shared low-voltage panel. When PV generation exceeds instantaneous demand, the surplus can be exported to the public grid, whereas when demand exceeds PV output, the deficit is supplied by the grid. During public-grid outages, the grid-tied PV system is disconnected by anti-islanding protection and stops generating; in that condition, continuity of data center operation is maintained by thermal generator sets.



Figure 1. Photograph of the University of Cuenca data center.



Figure 2. Rooftop PV installation (35 kWp) connected to the internal distribution panel.

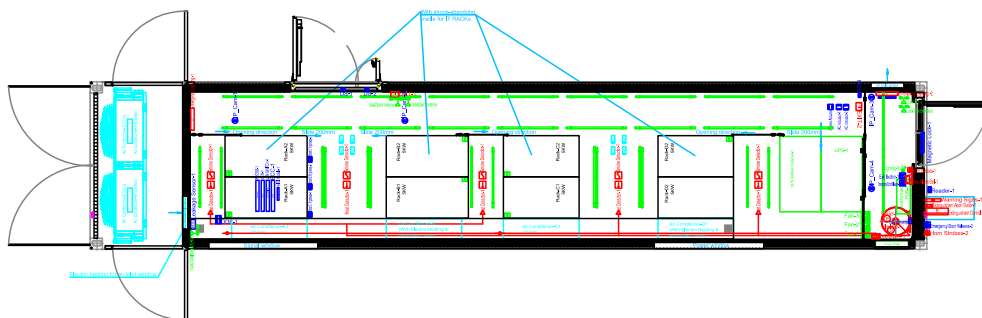


Figure 3. Internal composition of the data center used as a reference for the energy assessment (IT racks and cooling subsystems).

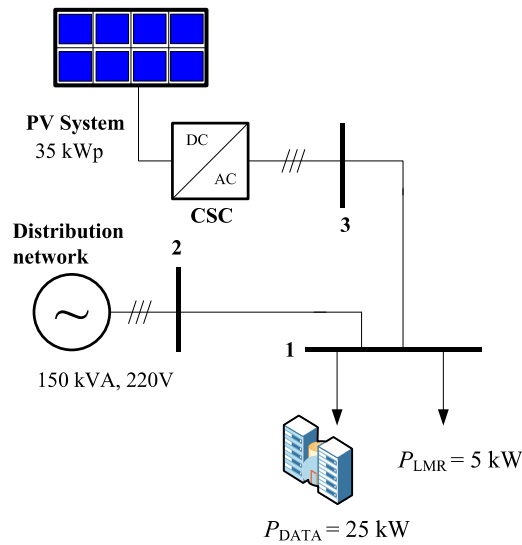


Figure 4. Electrical layout of the Microgrid Laboratory (LMR).

2.2. Data sources

The analysis uses a seven-year dataset spanning January 2018 through December 2024. It integrates electricity demand, PV production, and environmental records to characterize long-term behavior of the LMR facility and its onsite renewable supply. Electricity consumption was obtained from the internal metering infrastructure, which provides monthly and annual energy totals at the facility level for longitudinal assessment and interannual comparison. In parallel, PV generation data were retrieved from the inverter monitoring platform and cross-checked against local dataloggers connected to the DC/AC conversion stage. This cross verification reduces the likelihood of missing values and improves traceability when performance changes are observed over time.

To provide context for PV production variability and to support interpretation of seasonal and interannual trends, local meteorological measurements were also incorporated. Solar irradiance and ambient temperature records were collected from a nearby weather station operated by the Faculty of Engineering. These environmental series are not used to predict generation; instead, they provide a physical reference for expected fluctuations and help distinguish resource-driven changes (e.g., irradiance patterns) from system-driven changes (e.g., operational events).

A relevant methodological aspect is that the PV plant supplies a shared low-voltage panel feeding both the data center and auxiliary laboratory loads. Therefore, the “total demand” used in the PV coverage metrics corresponds to the combined energy consumption of the Microgrid Laboratory and the data center. To isolate the operational demand of the data center for subsequent analyses, a dedicated measurement campaign was conducted at the data center three-phase service entrance. The Results section reports both views—aggregate facility demand and data center demand—to avoid conflating infrastructure-level behavior with IT-room operation.

2.3. Renewable energy share assessment

On-site PV integration is quantified using complementary indicators that describe (i) the renewable fraction of the total demand supplied by the shared panel and (ii) the extent to which PV production is used locally. First, the Energy Share (ES) is computed as the ratio between PV generation and total electricity demand over a given accounting window (monthly, then aggregated annually). This indicator summarizes the renewable contribution relative to the energy needs of the supplied loads.

Because behind-the-meter PV generation can be consumed locally or exported to the public grid, the analysis distinguishes between PV generation and PV utilization. Self-consumption is defined as the fraction of PV energy used within the supplied loads, excluding any potential feed-in. Following the framework in [1], two indicators are reported:

- **Green Share (GS):** the proportion of electricity demand met by on-site PV generation within the same accounting period.
- **Renewable Energy Utilization Rate (REUR):** the fraction of total PV generation that is consumed locally within the supplied loads.

All indicators are computed on a monthly basis to preserve seasonal information and then aggregated annually to identify long-term trends in energy integration, operational stability, and PV-to-load matching. When interpreting the indicators, the manuscript distinguishes between metrics computed at the shared-panel level (laboratory + data center) and those derived from the dedicated data center measurements.

2.4. Avoided emissions estimation

Avoided carbon emissions are estimated using a displacement approach in which PV electricity consumed on-site offsets an equivalent amount of electricity that would otherwise be supplied by the public grid. For consistency with institutional greenhouse-gas (GHG) accounting, this work adopts the official annual grid-average emission factor for Ecuador Continental reported in the national “Factor de Emisión de CO₂ del Sistema Nacional Interconectado (SNI)” series coordinated by the Operador Nacional de Electricidad (CENACE) [11], [12], [13]. This choice aligns with the location-based method described in the GHG Protocol Scope 2 Guidance, which recommends using grid-average emission factors to represent the average emissions intensity of the electricity system where consumption occurs [14]. The same national reports also include project-oriented factors based on the UNFCCC combined-margin methodology (Tool 07) [15]; however, because the objective here is to quantify avoided emissions under operational self-consumption (behind-the-meter PV displacing grid electricity at the point of supply), the grid-average factor is the appropriate reference.

Avoided emissions are calculated as shown in Equation (1):

$$E_{avoided} = E_{PV,used} \times EF_{grid} \quad (1)$$

where $E_{PV,used}$ is the PV electricity consumed locally by the supplied loads and EF_{grid} is the annual grid emission factor (kg CO₂/kWh). This formulation follows common reporting practice for renewable displacement assessments and is consistent with the methodologies discussed in [7], [8]. When presenting results, avoided emissions are reported at monthly resolution and summarized annually to compare environmental outcomes across years.

2.5. Additional indicators

Beyond energy and emissions, the study considers complementary metrics when the required information is available in the monitoring records. In particular, an economic reference can be provided through the levelized cost of energy (LCOE) of the PV system, computed from capital expenditure, operation and maintenance costs, and cumulative electricity production over the assumed system lifetime. In addition, an operational environmental-intensity indicator can be discussed using Carbon Usage Effectiveness (CUE), relating carbon emissions to IT energy use. If these variables cannot be supported with sufficient data granularity or traceability for the study period, the manuscript limits its reporting to the energy-share and avoided-emissions indicators described above and states explicitly which inputs were not available.

3. RESULTS

3.1. Photovoltaic Generation Analysis

The annual and seasonal performance of the 35 kWp rooftop PV system was evaluated for 2018–2024 using inverter-reported production data cross-checked with local dataloggers. Table 2 summarizes the annual energy yield and the corresponding capacity factor, which represents the effective utilization of the installed capacity in each year. Over the study period, the PV system produced an average of about 34.4 MWh per year. Year-to-year variation reflects changes in operating conditions and solar resource availability. The highest annual output occurred in 2022 (47.3 MWh; capacity factor 15.4%), whereas the lowest occurred in 2024 (24.3 MWh; capacity factor 7.9%). The 2024 value must be interpreted in context because it coincided with an unusual operating period in Ecuador, with extended scheduled power outages associated with the national electricity crisis. Since the PV plant operates in a grid-tied, battery-less configuration, inverter anti-islanding protection disconnects generation during grid outages. As a result, the PV energy recorded by the monitoring system can drop even when solar resource is available. During those periods, the data center was supplied mainly by on-site generator sets, and the 2024 PV output does not reflect typical operation under continuous grid availability.

Table 2. Annual PV generation and capacity factor of the 35 kWp rooftop system (2018–2024).

Year	PV generation (kWh)	Capacity factor (%)
2018	34 665.1	11.3
2019	33 004.5	10.8
2020	34 309.6	11.2
2021	29 545.2	9.6
2022	47 289.0	15.4
2023	37 391.7	12.2
2024	24 257.0	7.9

At the seasonal scale, the monthly profiles presented later follow the local climatic cycle, with recurring periods of higher production during months with greater solar resource and reduced cloudiness. To further support this interpretation, Figure 5 compares the annual PV energy production with the annual solar irradiation measured by a meteorological station installed on the rooftop of the same building where the PV system is located. The results show a strong correspondence between both variables throughout most of the study period, indicating that interannual variations in PV generation are largely explained by the available solar resource. Although the irradiation data are presented at annual resolution, the Andean climate of Cuenca is characterized by alternating sunny and cloudy periods, influenced by seasonal rainfall patterns and regional meteorological anomalies such as El Niño-related variability, drought conditions, and prolonged dry spells. In this context, the higher irradiation observed in 2024 is consistent with reduced rainfall and clearer-sky conditions during the national drought period. However, a noticeable divergence appears in 2024, when PV production decreased disproportionately relative to the measured solar irradiation. This behavior is consistent with the extended scheduled power outages experienced in Ecuador during the national electricity crisis. Thus, the mismatch between irradiation and PV production in 2024 is mainly attributed to power outages associated with the drought-driven low-water period, rather than to a reduction in the available solar resource. Because the PV system operates in a grid-tied, battery-less configuration, anti-islanding protection disconnects the inverters whenever the public grid is

unavailable, preventing energy production even under favorable solar conditions. Therefore, the 2024 reduction in PV output should not be interpreted as a consequence of diminished solar resource availability but rather as the result of operational restrictions imposed by prolonged grid interruptions. This seasonal structure is used in the following subsections to interpret PV-to-load matching and the resulting renewable utilization indicators.

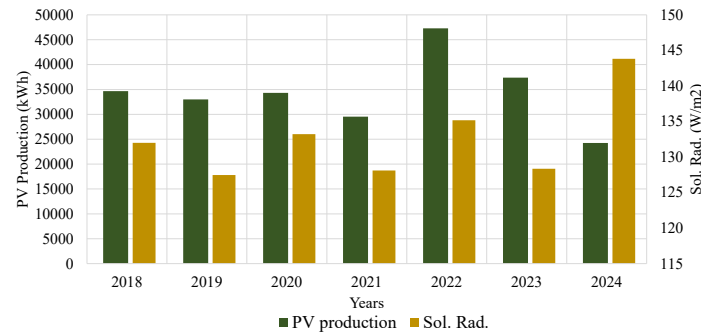


Figure 5. Annual solar irradiation measured at the rooftop meteorological station and annual PV energy production of the 35 kWp system (2018–2024).

3.2. Data Center Energy Consumption

Electricity demand at the data center increased over 2018–2024, consistent with the expansion of institutional digital services and the growing deployment of virtualized workloads. Although the overall trajectory is upward, the series presents distinct phases rather than a uniform, linear increase. Consumption remained relatively stable during the first two years of operation (2018–2019), followed by a pronounced increase in 2020–2021, consistent with the commissioning of additional computing and storage resources and the consolidation of new services. From 2022 onward, the facility operated at a higher demand level, with year-to-year variation associated with operational scheduling, workload dynamics, and infrastructure management practices.

Seasonal behavior is also evident in the monthly records. Higher energy use typically aligns with active academic periods (March–July and September–December), when user access, hosted platforms, and institutional services intensify. Lower consumption is observed during semester breaks, when user activity decreases and some computational tasks are reduced or rescheduled. In addition to workload-related drivers, the cooling subsystem contributes to seasonal variability because heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) operation depends on indoor setpoints and ambient conditions and may respond differently during warmer or more humid weeks.

The PV plant supplies a shared low-voltage panel feeding both the data center and auxiliary laboratory loads. Historical energy records indicate that the data center accounts for the dominant share of the combined Microgrid Laboratory + data center electricity demand; therefore, changes in aggregate facility energy largely follow data center operation. To support a clear separation between data center demand and other laboratory loads, a dedicated measurement campaign was conducted at the data center three-phase service entrance. This campaign provides an operational reference for typical daily energy use and weekday–weekend differences, which is later used to validate the allocation assumptions applied in the energy-share indicators.

Table 3 summarizes the annual electricity consumption of the data center for the analyzed period. A joint visualization comparing PV generation and data center demand is presented in a subsequent subsection to support the statistical interpretation of renewable contribution under evolving load conditions.

Table 3. Annual electricity consumption of the University of Cuenca data center (2018–2024).

Year	Data center consumption (kWh)
2018	63 019.62
2019	66 220.96
2020	112 013.29
2021	111 484.00
2022	145 045.34
2023	153 153.91
2024	149 261.40

In addition to the historical monthly and annual records, the measurement campaign at the data center three-phase service entrance was used to characterize a representative short term operating profile and to support the separation between data center demand and auxiliary laboratory loads. The campaign covered seven consecutive days (including working days and the weekend) and recorded the daily energy exchanged at the data center point of common coupling. Figure 6 shows the resulting weekly pattern: daily consumption remains relatively stable during weekdays, with a moderate reduction on Saturday and Sunday, consistent with lower user activity and reduced workload intensity outside regular institutional schedules.

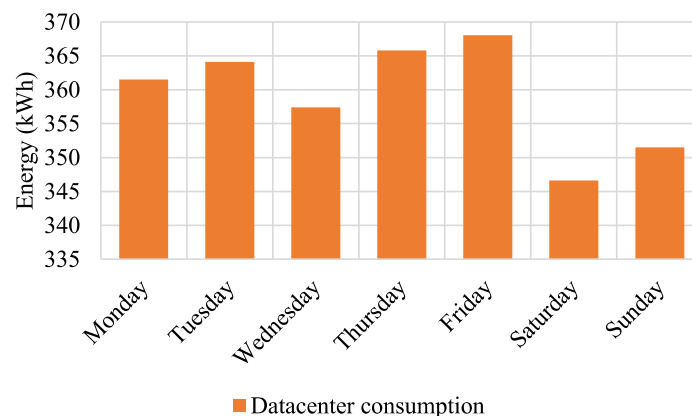


Figure 6. Typical weekly data center energy consumption measured at the three-phase service entrance during a 7-day campaign (weekday vs weekend operation).

3.3. Energy Balance and PV Contribution

The energy balance compares the annual PV production of the 35 kWp rooftop plant against the electricity demand supplied at the same low-voltage panel. Figure 7 summarizes this balance by displaying PV generation and data center consumption together, which supports interpretation of how the renewable contribution changes as institutional workload evolves over time. While PV production remains within the same order of magnitude across the monitoring horizon, data center demand shows a step increase starting in 2020 and remains higher thereafter. Consequently, the relative contribution of PV declines in years with higher IT activity, even when PV yield is stable.

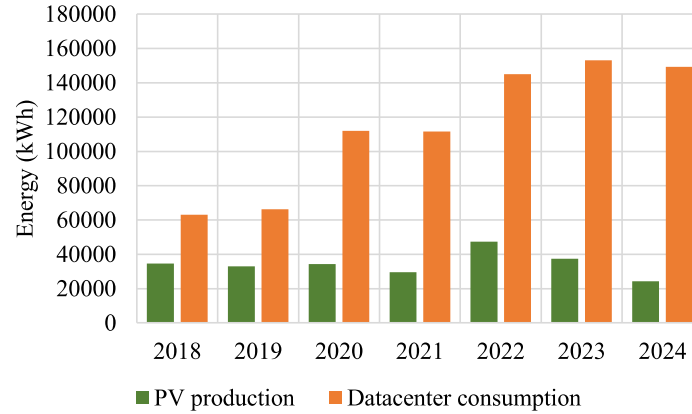


Figure 7. Annual energy balance between PV generation and data center electricity consumption (2018–2024).

Following the indicators defined in Section 2, PV coverage of the total supplied demand (Microgrid Laboratory + data center) ranges from 52.8% (2018) to 15.6% (2024). The decline after 2019 is explained mainly by growth in electricity demand rather than by a persistent reduction in PV output. Over 2018–2024, cumulative PV generation reached 240.5 MWh, representing on-site renewable electricity produced during institutional operation.

Results for 2024 require careful interpretation. That year coincided with an unusual national operating context in Ecuador characterized by extended scheduled power outages. Because the PV system is grid-tied and battery-less, inverter anti-islanding protection disconnects PV generation during grid interruptions, which can reduce recorded PV energy even when solar resource is available. During these periods, data center continuity relied mainly on on-site thermal generator sets. For this reason, 2024 is treated as an outlier year in the discussion, and results are also interpreted using the pre-crisis years (2018–2023) as a reference baseline.

The observed PV contribution reduces grid electricity purchases and associated operating costs and increases avoided emissions. The corresponding economic and environmental impacts are quantified in the subsequent subsections using the tariff and emission-factor assumptions described in the Methods section.

3.4. Emission Reduction

Avoided carbon emissions were estimated using a displacement approach in which PV electricity used on-site offsets an equivalent amount of electricity that would otherwise be supplied by the public grid. Consistent with Section 2, avoided emissions over a given accounting period are computed according to Equation 2:

$$E_{avoided} = E_{PV,used} \times EF_{grid} \quad (2)$$

where $E_{PV,used}$ is the PV energy consumed behind the meter and EF_{grid} is the grid-average emission factor (kg CO₂/kWh). As the PV system operates in a battery-less, grid-tied configuration and the supplied loads are large relative to PV capacity, self-consumption is close to 100% during normal operation. Therefore, for annual accounting, $E_{PV,used}$ is approximated by the total measured PV generation when export is negligible. If export data are available, the same formulation applies by subtracting exported energy from total generation.

Baseline avoided emissions using official Ecuadorian factors

Grid emission factors were obtained from the annual reports published by Ecuador's electricity operator (CENACE) and environmental authorities (MAATE), following the GHG

Protocol guidance for institutional inventories. These factors reflect the average carbon intensity of the national electricity mix (Sistema Nacional Interconectado, SNI) and are suitable for location-based emission accounting in public-sector facilities. For the 2018–2024 period, this study adopts an estimated range of 0.27–0.30 kg CO₂/kWh to reflect interannual variability and reporting conventions [11], [12], [13].

Table 4 reports the resulting annual range, computed by applying the lower and upper emission-factor bounds to each year’s PV generation. Over 2018–2024, cumulative avoided emissions fall within the range given by Equation (3):

$$E_{avoided,tot} \in [64,9,72,1] \text{ tCO}_2 \quad (3)$$

which represents the net reduction in emissions associated with PV-based self-consumption under national grid conditions.

Table 4. Avoided emissions estimated from annual PV generation using the national emission-factor range (0.27–0.30 kg CO₂/kWh).

Year	PV used (kWh)	Avoided emissions (tCO ₂)	
		0.27 kg/kWh	0.30 kg/kWh
2018	34 665.1	9.36	10.40
2019	33 004.5	8.91	9.90
2020	34 309.6	9.26	10.29
2021	29 545.2	7.98	8.86
2022	47 289.0	12.77	14.19
2023	37 391.7	10.10	11.22
2024	24 257.0	6.55	7.28
Total	240 462.1	64.92	72.14

Interannual variability and interpretation (including 2024)

Year-to-year variation in avoided emissions is driven primarily by changes in PV generation. In this dataset, the highest annual reduction occurred in 2022 (14.2 tCO₂), while the lowest corresponds to 2024, which reflects an atypical operating context. During that year, Ecuador experienced extended scheduled grid outages related to a national electricity supply crisis. Because the PV system is grid-tied, inverter anti-islanding protection prevented operation during interruptions, even under available solar resource. Consequently, 2024 results do not represent standard PV performance under continuous grid availability. During those periods, data center operation relied mainly on on-site thermal generators, which fall outside the emission displacement calculation. For consistency, the Discussion section treats 2024 as an outlier and uses 2018–2023 as a baseline for typical grid-tied operation.

Sensitivity to higher carbon intensity scenarios

To assess the influence of grid carbon intensity, the avoided-emissions estimate was recalculated using a more conservative scenario aligned with thermal-dominated generation contexts. Under $EF_{grid} = 0.40$ kg CO₂/kWh, cumulative avoided emissions rise to the value given by Equation 4:

$$E_{avoided,tot} (0.40) = 96.2 \text{ tCO}_2, \quad (4)$$

illustrating the increased environmental benefit of PV when the displaced grid electricity has higher emission content. This sensitivity analysis supports comparisons across regions and underscores the relevance of PV integration under evolving generation mixes.

4. DISCUSSION

This study quantified the long-term interaction between a rooftop PV plant and an institutional data center operating continuously since 2018. The results offer a practical perspective on sustainability outcomes in a university setting: a measurable share of electricity demand is supplied by onsite renewables, PV generation is largely self-consumed due to the persistent base-load behavior of the data center, and avoided emissions can be estimated under the national electricity mix using recognized accounting practices. The use of complementary indicators such as Green Share (GS) and Renewable Energy Utilization Rate (REUR) (Murino et al., 2023) distinguishes between the share of demand met by renewables and the fraction of PV generation consumed onsite. This distinction is especially relevant in the LMR configuration, where the PV system supplies a shared low-voltage panel and the data center dominates the total demand. Additionally, the dedicated three-phase measurement campaign at the data center entrance provides a reference for typical weekday–weekend operation and supports load disaggregation.

The PV–demand balance shows that the decline in PV coverage after the initial years is primarily driven by increased consumption (not reduced output), particularly following a step change in 2020. This is consistent with institutional growth through virtualization, storage expansion, and service consolidation. The analysis also clarifies why real operating demand is often below nameplate ratings: IT power depends on utilization levels and rack population, and precision A/C units modulate input based on thermal loads and setpoints, with redundancy strategies keeping some units partially loaded or on standby.

The operating conditions in 2024 must be interpreted separately. Extended scheduled outages during Ecuador’s electricity crisis led to a temporary loss of PV contribution due to anti-islanding protections in the battery-less, grid-tied configuration. During these periods, the facility relied on thermal backup generators, which are excluded from the emission reduction calculation. This contrast highlights the difference between sustainability under normal grid operation and resilience during supply disruptions.

Regarding emissions, while the grid in Ecuador has traditionally been low in carbon intensity due to hydropower dominance, cumulative avoided emissions remain relevant over multi-year operation. The estimates in this study are consistent with institutional reporting frameworks such as the GHG Protocol, using official annual grid-average emission factors published by CENACE and MAATE [11], [12]. The sensitivity analysis shows that avoided emissions increase in proportion to the grid’s carbon intensity, reinforcing the environmental value of PV as generation mixes evolve.

The findings support two upgrade pathways that could enhance both indicator performance and operational resilience: (i) incorporating energy storage to increase PV utilization through time-shifting and to enable autonomous operation during outages via islanding-capable control; and (ii) scaling PV capacity to match post-2020 demand growth and recover earlier coverage levels as digital workloads continue expanding.

Limitations and opportunities for future work are tied to data granularity and operational traceability. Extending submetering to separate IT loads, cooling systems, and auxiliary circuits would allow more refined energy allocation and enable metrics such as Carbon Usage Effectiveness (CUE). Incorporating inverter status logs and maintenance records would improve interpretation during abnormal periods. Beyond hardware upgrades, future studies may explore workload-aware scheduling and cooling setpoint optimization, supported by data center

infrastructure management (DCIM) tools aligned with institutional service delivery and energy availability.

5. CONCLUSIONS

This work evaluated seven years of operation (2018–2024) of a university data center partially supplied by a 35 kWp rooftop PV plant. Historical energy records, PV monitoring data, and local environmental measurements were combined to characterize long-term performance and renewable contribution. The results indicate that on-site PV generation supplies a measurable share of the facility's energy needs and supports sustained avoided emissions. They also show that the evolution of demand, in addition to PV yield, determines the renewable fraction as institutional digital services expand. The study further clarifies the practical difference between nameplate ratings and operating demand in data center environments, where IT utilization, cooling control, and redundancy policies lead to power levels below installed capacity during normal operation. The operating conditions observed in 2024, marked by extended grid outages, illustrate the limitations of a battery-less, grid-tied PV configuration and motivate upgrades oriented to resilience.

Finally, the analyzed facility provides a reference for campus digital infrastructure supplied by on-site renewables, and the reported indicators point to improvement pathways through enhanced submetering, integration of energy storage to increase PV utilization and support operation during outages, and potential scaling of PV capacity to align with growing workloads.

ACKNOWLEDGMENTS: The authors acknowledge the support of the Microgrid Laboratory at the Faculty of Engineering of the University of Cuenca for providing access to the experimental infrastructure and for the technical assistance that enabled the measurement campaign, data collection, and energy assessment reported in this work. The authors also thank the University of Cuenca Information Technologies Directorate (DTIC), led by Pablo Pintado Zumba (Acting Director of DTIC until January 2026), for facilitating access to operational information and historical records of the data center analyzed in this article.

REFERENCES

- [1] T. Murino, R. Monaco, P. S. Nielsen, X. Liu, G. Esposito, and C. Scognamiglio, "Sustainable Energy Data Centres: A Holistic Conceptual Framework for Design and Operations", *Energies*, vol. 16, no. 15, pp. 5764, ago. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en16155764>
- [2] N. Hinov, "From Energy Efficiency to Energy Intelligence: Power Electronics as the Cognitive Layer of the Energy Transition", *Electronics*, vol. 14, no 23, pp. 4673, nov. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics14234673>
- [3] M. Sarac, S. Adamovic, and D. Stamenkovic, "Experimental Analysis of Energy Efficiency of Server Infrastructure in University Datacenters", *Teh. vjesn.*, vol. 27, no 5, oct. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17559/TV-20160517155453>
- [4] K. L. Veigas, A. Chinnici, D. De Chiara, and M. Chinnici, "Towards Energy Efficiency of HPC Data Centers: A Data-Driven Analytical Visualization Dashboard Prototype Approach", *Electronics*, vol. 14, no 16, pp. 3170, ago. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics14163170>
- [5] M. D. Dikaiakos *et al.*, "A cyber-physical management system for medium-scale solar-powered data centers", *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, vol. 35, no 10, pp. e7658, may 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/cpe.7658>

- [6] A. Tryfonos *et al.*, “ENEDI: Energy Saving in Datacenters”, in *2018 IEEE Global Conference on Internet of Things (GCIoT)*, Alexandria, Egypt: IEEE, dic. 2018, pp. 1-5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/GCIoT.2018.8620159>
- [7] K. Zhang, P. Wang, N. Gu, and T. D. Nguyen, “GreenDRL: managing green datacenters using deep reinforcement learning”, in *Proceedings of the 13th Symposium on Cloud Computing*, San Francisco California: ACM, nov. 2022, pp. 445-460. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3542929.3563501>
- [8] Y. Zhou, F. Wei, S. Li, Z. Wang, J. Liu, and D. Yu, “Data center load modeling through optimal energy consumption characteristics: A path to simultaneously enhance energy efficiency and demand response quality”, *Applied Energy*, vol. 393, p. 126095, sep. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126095>
- [9] J. Xing, and B. C. Lee, “Datacenter Demand Response for Carbon Mitigation: From Concept to Practicality: Invited Paper”, in *2024 IEEE 15th International Green and Sustainable Computing Conference (IGSC)*, Austin, TX, USA: IEEE, nov. 2024, pp. 142-144. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IGSC64514.2024.00034>
- [10] J. L. Espinoza, L. G. González, y R. Sempértegui, "Micro grid laboratory as a tool for research on non-conventional energy sources in Ecuador", in *2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, Mexico: IEEE, nov. 2017, pp. 1-7. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ROPEC.2017.8261615>
- [11] Operador Nacional de Electricidad (CENACE), "Factor de Emisión del CO2 del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador - Año 2024". [Online]. Available: https://arconel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2025/09/Factor-de-emision-de-CO2-del-Sistema-Nacional-Interconectado-de-Ecuador-Informe-2024_compressed.pdf
- [12] Operador Nacional de Electricidad (CENACE), “Factor de Emisión de CO2 del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador - Informe 2023”. [Online]. Available: <https://www.ambienteyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2024/09/Factor-de-emision-de-CO2-del-Sistema-Nacional-Interconectado-de-Ecuador-Informe-2023-comprimido.pdf>
- [13] Operador Nacional de Electricidad (CENACE), “Factor de Emisión del CO2 del Sistema Nacional Interconectado de Ecuador - Informe 2021”. [Online]. Available: <https://www.cenace.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/12/Informe-Factor-de-CO2-2021.pdf>
- [14] Greenhouse Gas Protocol Initiative, “GHG Protocol Scope 2 Guidance: An Amendment to the GHG Protocol Corporate Standard”. [Online]. Available: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2023-03/Scope%202%20Guidance.pdf>
- [15] Operador Nacional de Electricidad (CENACE), “Factor de Emisión del CO2 del Sistema Nacional Interconectado de Ecuador - Informe 2022”. [Online]. Available: <https://www.ambienteyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2023/08/wp-1692720103183.pdf>



Uso de espacios públicos urbanos en Quito postpandemia: calidad, percepción y diseño

(Urban Public Space Use in Quito in the Post-Pandemic Context: Spatial Quality, User Perception, and Urban Design)

Mauricio Leonel Mendoza Riofrio
Investigador independiente, Quito, Ecuador
mauro_s.p.c@hotmail.com

Resumen: La pandemia de COVID-19 causó un cambio significativo en la relación entre la sociedad y el espacio público, lo que puso de manifiesto su importancia como infraestructura clave para la calidad de vida en las ciudades. La ciudad de Quito se distingue por tener una estructura territorial diversa, estas transformaciones aparecen de forma distinta según las condiciones socioespaciales. Esta investigación examina la utilización de los espacios públicos en el escenario postpandemia, a través de tres aspectos que son: percepción ciudadana, diseño urbano y calidad espacial. Se desarrolló un estudio con enfoque mixto, diseño no experimental y alcance descriptivo. La investigación se realizó en seis espacios públicos representativos de diferentes sectores urbanos de Quito. Se aplicaron encuestas a usuarios mayores de 18 años (seleccionados mediante muestreo no probabilístico por conveniencia), entrevistas semiestructuradas y observación directa sistemática. Se detectaron cambios en la frecuencia de uso de 28 % a 46 %, predominio de actividades recreativas (32 %) y de ejercicio físico (27 %), así como valoraciones positivas de limpieza, iluminación y seguridad. Además, los usuarios otorgaron una alta valoración al equipamiento urbano (media = 4,6), todas las variables determinan cómo se apropia el espacio. Los hallazgos muestran que el uso se intensificó, que hay un aumento de la sensibilidad frente a estándares de calidad y seguridad, y que existe una conexión directa entre el diseño urbano y la conducta social. Se infiere que el espacio público ha obtenido una centralidad renovada en la planificación urbana actual, exigiendo perspectivas más inclusivas, resilientes y enfocadas en el usuario.

Palabras clave: Habitabilidad urbana; Apropiación del espacio; Cohesión social; Satisfacción ciudadana; Resiliencia urbana; Planificación territorial.

Abstract: The COVID-19 pandemic caused a significant shift in the relationship between society and public space, highlighting its importance as key infrastructure for quality of life in cities. In Quito, a city distinguished by its diverse territorial structure, these transformations manifested differently depending on socio-spatial conditions. This research examines the use of public spaces in the post-pandemic scenario through three aspects: citizen perception, urban design, and spatial quality. A mixed-method, non-experimental, and descriptive study was conducted. The research took place in six representative public spaces across different urban sectors of Quito. Surveys were administered to users over 18 years of age (selected through non-probability convenience sampling), along with semi-structured interviews and systematic direct observation. Changes in frequency of use were detected, increasing from 28% to 46%, with a predominance of recreational activities (32%) and physical exercise (27%), as well as positive assessments of cleanliness, lighting, and safety. Furthermore, users gave high marks to urban amenities (mean = 4.6), variables that determine how space is appropriate. The findings show that usage has intensified, that there is increased sensitivity to quality and safety standards, and that there is a direct connection between urban design and social behavior. It can be inferred that public space has gained renewed centrality

in current urban planning, demanding more inclusive, resilient, and user-centered perspectives.

Keywords: Urban livability; Place appropriation; Social cohesion; Citizen satisfaction; Urban resilience; Spatial planning.

1. INTRODUCCIÓN

El espacio público constituye un elemento estructurante del sistema urbano, no solo como ámbito de encuentro y circulación, sino también como escenario para la interacción social, la construcción de ciudadanía y la producción simbólica [1]. Desde la perspectiva contemporánea del urbanismo, se reconoce como un indicador fundamental de calidad urbana, equidad territorial y cohesión social. En este sentido, parques, plazas, calles peatonales y áreas verdes desempeñan un papel esencial en la generación de entornos seguros, accesibles y funcionales que favorecen la convivencia, la recreación y el bienestar de la población.

En América Latina, y particularmente en Ecuador, las ciudades han experimentado procesos de expansión urbana acelerada, fragmentación socioespacial y distribución desigual de equipamientos y servicios urbanos con la idea [2]. En este contexto, Quito presenta una estructura territorial compleja caracterizada por contrastes significativos entre sectores consolidados con adecuada dotación de infraestructura y áreas periféricas que registran déficits de espacio público y condiciones limitadas de accesibilidad [3].

La pandemia de COVID-19 transformó significativamente las dinámicas urbanas y los patrones de utilización del espacio público. Las restricciones de movilidad y las medidas de confinamiento implementadas para reducir los contagios limitaron temporalmente el acceso a espacios colectivos, pero también evidenciaron su relevancia para la salud física, mental y social de la población [4], [5]. Como consecuencia, diversas ciudades latinoamericanas experimentaron procesos de revalorización de parques, plazas y áreas abiertas, consolidando al espacio público como un componente esencial para la resiliencia urbana.

Estudios desarrollados en Chile y Colombia reportan un incremento en la utilización de espacios abiertos durante el periodo posterior a la pandemia, acompañado de una mayor valoración de la accesibilidad, proximidad y calidad ambiental de estos entornos [6]. De manera similar, en México se ha identificado que el uso del espacio público se encuentra estrechamente relacionado con la disponibilidad de infraestructura verde, la calidad del entorno urbano y las condiciones de seguridad percibida [6], [7]. En Lima, Perú, investigaciones recientes evidencian que la recuperación de actividades recreativas y deportivas en espacios públicos ha estado condicionada por la disponibilidad y calidad de la infraestructura urbana [3], [6], [8].

Aunque estos estudios evidencian tendencias comunes en la región, las características territoriales y urbanas particulares de cada ciudad influyen en la magnitud y naturaleza de dichas transformaciones. En consecuencia, resulta necesario analizar el caso específico de Quito, donde la configuración longitudinal del territorio, la compleja topografía y la existencia de múltiples centralidades generan diferencias significativas en la distribución y calidad del espacio público urbano [3].

En Quito, los espacios públicos adquirieron una importancia creciente durante la etapa posterior a la pandemia, especialmente para actividades asociadas con la recreación, el ejercicio físico y la interacción social. Sin embargo, el uso y apropiación de estos espacios continúa condicionado por factores como la accesibilidad, la percepción de seguridad, la calidad ambiental y las características del diseño urbano. Asimismo, persisten desigualdades territoriales que limitan el acceso equitativo a espacios públicos de calidad, particularmente en sectores periféricos de la ciudad.

A pesar de que diversas investigaciones latinoamericanas han documentado los cambios en el uso del espacio público durante y después de la pandemia, aún existe un vacío de conocimiento respecto a la interacción entre la calidad espacial, la percepción ciudadana y los atributos del diseño urbano en contextos metropolitanos caracterizados por marcadas desigualdades territoriales. En el caso de Quito, los estudios disponibles se han concentrado principalmente en aspectos relacionados con la distribución y accesibilidad de áreas verdes y espacios públicos [3], así como en la valoración de los servicios ecosistémicos y la percepción ciudadana asociada a las zonas verdes urbanas [9], sin analizar de manera integrada cómo estos factores inciden en los procesos de uso y apropiación social del espacio. Esta limitación dificulta la formulación de estrategias urbanas sustentadas en evidencia empírica para fortalecer la calidad y equidad del espacio público en el escenario postpandemia.

En respuesta a esta problemática, el presente estudio tiene como objetivo analizar los cambios en el uso, la valoración y la percepción del diseño de los espacios públicos urbanos en el Distrito Metropolitano de Quito durante la etapa posterior a la pandemia. Además de identificar variaciones en la frecuencia de uso, se busca comprender cómo factores asociados a la seguridad percibida, la accesibilidad, la calidad espacial y el diseño urbano influyen en los procesos de apropiación social del espacio público.

Asimismo, la evidencia disponible para América Latina señala que la disponibilidad y accesibilidad de espacios verdes urbanos se asocia con beneficios para la salud física y mental de la población, al promover la actividad física, favorecer el bienestar psicológico y generar oportunidades para la interacción social y la mejora de la calidad de vida en los entornos urbanos [10].

La evidencia científica reciente ha señalado que la pandemia puso de manifiesto limitaciones presentes en los modelos tradicionales de planificación urbana y destacó la necesidad de desarrollar ciudades más resilientes, inclusivas y adaptables frente a futuras crisis sanitarias y sociales [11]. En este contexto, el diseño y la gestión del espacio público requieren incorporar criterios relacionados con la adaptabilidad, la inclusión y la resiliencia urbana, superando enfoques centrados exclusivamente en aspectos funcionales o formales.

Por tanto, el estudio contribuye a la comprensión de las transformaciones experimentadas por el espacio público urbano en el periodo postpandemia y aporta evidencia para orientar estrategias de planificación y diseño urbano dirigidas a fortalecer la calidad, sostenibilidad y equidad de los espacios públicos en el Distrito Metropolitano de Quito.

2. METODOLOGÍA

El estudio tuvo un alcance descriptivo y exploratorio, orientado a caracterizar las dinámicas de utilización, apropiación y valoración ciudadana del espacio público en condiciones reales, sin manipulación de variables. Se adoptó un enfoque metodológico mixto de tipo concurrente, convergente, integrando simultáneamente técnicas cuantitativas y cualitativas para analizar el uso de los espacios públicos urbanos en Quito postpandemia: calidad, percepción y diseño. Este diseño permitió recolectar y analizar de manera paralela información procedente de encuestas, observación directa y entrevistas semiestructuradas, para posteriormente triangular los resultados y obtener una comprensión integral del fenómeno estudiado [12]. La elección de este diseño responde a la necesidad de examinar tanto los patrones observables de uso del espacio público como las percepciones, experiencias y valoraciones de sus usuarios desde una perspectiva multidimensional (Tabla 1). La investigación respetó los principios éticos de participación voluntaria, consentimiento informado, anonimato y confidencialidad de la información proporcionada por los participantes.

Tabla 1. Técnicas e instrumentos.

Técnica	Propósito	Tipo de información
Encuesta	Medición de percepción y uso	Cuantitativa
Observación sistemática	Registro de comportamiento	Mixta
Entrevista semiestructurada	Interpretación de experiencias	Cualitativa

La población de estudio estuvo conformada por usuarios de espacios públicos urbanos del Distrito Metropolitano de Quito. Los criterios de inclusión consideraron personas mayores de 18 años, usuarios presentes en los espacios públicos seleccionados durante el trabajo de campo y participantes que aceptaron voluntariamente formar parte del estudio. Se excluyeron menores de edad, cuestionarios incompletos y personas que no otorgaron su consentimiento para participar.

La muestra estuvo integrada por 300 usuarios encuestados y 20 participantes entrevistados. El trabajo de campo se desarrolló durante cuatro semanas consecutivas entre abril y mayo de 2025, en jornadas realizadas de lunes a domingo entre las 08h00 y 12h00 y entre las 15h00 y 19h00. Se efectuaron observaciones sistemáticas en cada uno de los seis espacios públicos analizados, con una duración aproximada de 60 minutos por sesión.

La caracterización de la muestra permitió identificar la distribución de los participantes según variables sociodemográficas y frecuencia de uso de los espacios públicos analizados. Esta información (Tabla 2) aporta contexto para la interpretación de los resultados y facilita la comprensión de los perfiles predominantes de usuarios.

Tabla 2. Perfiles predominantes de usuarios.

Variable	Categoría	n	%
Género	Masculino	156	52,0
Género	Femenino	144	48,0
Edad	18-29 años	102	34,0
Edad	30-44 años	96	32,0
Edad	45-59 años	63	21,0
Edad	≥60 años	39	13,0
Frecuencia de uso	Alta	138	46,0
Frecuencia de uso	Media	114	38,0
Frecuencia de uso	Baja	48	16,0
Total		300	100

La muestra presenta una distribución equilibrada por género, con una ligera predominancia masculina (52 %). Los grupos etarios entre 18 y 44 años concentran el 66 % de los participantes, evidenciando una mayor presencia de población joven y adulta en los espacios públicos analizados. Asimismo, la frecuencia alta de uso representa el 46 % de la muestra, lo que confirma la importancia que estos espacios han adquirido dentro de las dinámicas urbanas postpandemia.

Se realizaron entrevistas semiestructuradas a un total de 20 usuarios de espacios públicos en Quito, elegidos mediante un muestreo intencional para asegurar la diversidad de perfiles. Los criterios de selección abarcaban variables sociodemográficas (edad, género y ocupación), además de patrones de uso del espacio público (usuarios frecuentes, ocasionales y no usuarios), con el propósito de recoger distintas experiencias y percepciones sobre su apropiación, uso y valoración. Este método posibilitó integrar tanto puntos de vista sobre la apropiación activa del espacio como críticas relacionadas con su desuso, enriqueciendo el estudio del fenómeno.

Las entrevistas se organizaron con base en una guía adaptable que trató temas como la percepción de seguridad, el sentido de pertenencia, las barreras de acceso, la calidad del entorno y la valoración del diseño urbano. Esta estructura promovió la comparación de respuestas y a la vez permitió a los participantes compartir libremente sus experiencias y opiniones. La recopilación de datos se realizó hasta llegar a un nivel de saturación teórica, es decir, cuando las respuestas empezaron a mostrar repetición en los temas tratados, lo que señala coherencia en los patrones reconocidos.

El cuestionario para las encuestas estuvo conformado por 24 preguntas distribuidas en cuatro dimensiones: frecuencia de uso, percepción de seguridad, calidad espacial y valoración del diseño urbano. Las respuestas fueron registradas mediante una escala tipo Likert de cinco niveles. El instrumento fue sometido a validación de contenido mediante revisión de expertos en urbanismo y planificación territorial. La consistencia interna del cuestionario fue evaluada mediante el coeficiente alfa de Cronbach (Tabla 3), obteniéndose un promedio de 0,84, reflejando valores aceptables de confiabilidad para las dimensiones analizadas.

Tabla 3. Consistencia interna del instrumento de entrevista

Dimensión	Número de preguntas	n	Alfa de Cronbach
Frecuencia de uso	6	20	0,78
Percepción de seguridad	6	20	0,82
Calidad espacial	6	20	0,85
Valoración del diseño urbano	6	20	0,87
Instrumento total	24	20	0,84

La selección de los casos de estudio respondió un muestreo deliberado orientado a representar la diversidad socioespacial existente en el Distrito Metropolitano de Quito, para ello se consideraron criterios de localización territorial, tipología funcional, nivel de consolidación urbana, condiciones socioeconómicas del entorno y disponibilidad de infraestructura pública (Tabla 3). La incorporación de parques metropolitanos, barriales, lineales, recreativos, plazas históricas y espacios recuperados permitió incluir contextos urbanos con diferentes niveles de equipamiento, accesibilidad, intensidad de uso y calidad espacial. Esta estrategia buscó capturar las heterogeneidades presentes en la estructura urbana de Quito y garantizar que los resultados reflejaran distintas realidades territoriales, evitando concentrar el análisis en un único tipo de espacio público o sector urbano.

Tabla 3. Caracterización de los espacios analizados.

Espacio	Tipo	Sector urbano	Condición urbana	Nombre
Parque A	Metropolitano	Norte	Consolidado	Parque metropolitano Guangüiltagua
Parque B	Barrial	Sur	Vulnerable	Parque Chillogallo
Plaza C	Histórico	Centro	Patrimonial	Plaza Sucre
Parque D	Lineal	Oeste	En transformación	Parque lineal Mena Dos
Parque E	Recreativo	Norte	Equipado	Parque La Carolina
Espacio F	Residual	Sur	Recuperado	Parque El Tiempo

Para la recolección de datos cuantitativos se utilizaron encuestas constituidas en una muestra de 300 usuarios de espacios públicos en Quito (Tabla 3), seleccionados a través de un muestreo no probabilístico por conveniencia, tomando en cuenta criterios de diversidad territorial, tipología de espacio público y frecuencia de uso. Este instrumento posibilitó la medición de variables fundamentales, entre ellas el grado de satisfacción, la percepción de seguridad, la frecuencia de uso, el acceso y la evaluación del diseño urbano, facilitando que las percepciones fueran cuantificadas de manera sistemática y que distintos grupos de usuarios pudieran ser comparados entre sí.

Para registrar de forma sistemática los modelos reales de uso y conducta de los usuarios, se realizó un proceso de observación directa en las áreas públicas elegidas (Tabla 3). Esta técnica fue aplicada a través de recorridos organizados en campo, que emplearon fichas de observación previamente creadas. Estas ayudaron a registrar variables como el tipo de actividades llevadas a cabo (recreativas, culturales, sociales o deportivas), la duración del tiempo que los usuarios permanecieron y los niveles de ocupación, así como las dinámicas de interacción social. Además, se tomaron en cuenta factores espaciales como la utilización de zonas determinadas dentro del espacio público, la forma en que están distribuidos los usuarios y el vínculo entre el diseño ambiental y las conductas observadas.

El propósito de la observación fue detectar cambios en el uso del espacio público en Quito a lo largo del tiempo. Esta perspectiva hizo posible detectar patrones de comportamiento que varían según la hora del día, además de identificar elementos que influyen sobre la seguridad y las condiciones del entorno urbano. De igual forma, se tomó un enfoque no participante, en el que el investigador no intervino en las dinámicas observadas, lo cual permitió asegurar un registro más sistemático y objetivo de la información. Esta metodología sirvió para cotejar la información adquirida a través de encuestas con la conducta real de los usuarios, lo que posibilitó corroborar y enriquecer los datos autorreportados.

Adicionalmente, se realizó un análisis documental basado en fuentes secundarias oficiales con el propósito de contextualizar y complementar la información obtenida en campo. Para ello, se revisaron estadísticas e indicadores del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) [13], así como instrumentos de planificación territorial del Distrito Metropolitano de Quito, entre ellos el Plan Metropolitano de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PMDOT) [14] y el Plan de Uso y Gestión de Suelo (PUGS) [15]. Esta revisión permitió identificar variables urbanas y sociodemográficas relevantes para el análisis de la calidad, disponibilidad y distribución del espacio público.

Para el análisis comparativo se consideraron dos periodos temporales: prepandemia (2018–2019) y postpandemia (2022–2024). Debido a que el levantamiento de información se realizó en 2025, los datos correspondientes a ambos periodos fueron obtenidos mediante preguntas retrospectivas dirigidas a los participantes, orientadas a identificar cambios percibidos en los patrones de uso, las actividades desarrolladas y la valoración de los espacios públicos. En consecuencia, los resultados deben interpretarse considerando la posible existencia de sesgos de memoria asociados al recuerdo de experiencias previas.

La información cuantitativa fue procesada mediante IBM SPSS Statistics versión 29, aplicando procedimientos de estadística descriptiva, incluyendo frecuencias absolutas, porcentajes, medidas de tendencia central y cruces descriptivos entre variables. Paralelamente, la información cualitativa procedente de entrevistas y observaciones fue analizada mediante Atlas.ti versión 24, utilizando procesos de codificación abierta, categorización temática e identificación de categorías emergentes relacionadas con la apropiación del espacio público, la seguridad percibida, las barreras de acceso y la valoración del entorno urbano. Finalmente, los resultados de ambos enfoques fueron integrados mediante triangulación metodológica, permitiendo contrastar los patrones estadísticos con las experiencias reportadas por los participantes y obtener una

comprensión integral de las transformaciones experimentadas por los espacios públicos urbanos de Quito en el contexto postpandemia.

3. RESULTADOS

A partir de la muestra de 300 usuarios se obtuvieron resultados enfocados a dos categorías principales alteraciones en la frecuencia de uso y a la transformación de los patrones de actividades

3.1. Alteraciones en la frecuencia de uso

Los resultados evidencian una variación notable en la frecuencia de uso del espacio público en Quito entre el periodo prepandemia (2018–2019) y el postpandemia (2022–2024), tal como se observa en la Tabla 4 (n=300 usuarios).

Tabla 4. Frecuencia de uso.

Frecuencia	Antes (%) (2018-2019)	Antes (n)	Después (%) (2022-2024)	Después (n)
Alta	28	84	46	138
Media	42	126	38	114
Baja	30	90	16	48
Total	100	300	100	300

Los datos correspondientes al periodo prepandemia fueron obtenidos mediante reconstrucción retrospectiva auto informada por los participantes. En consecuencia, los resultados deben interpretarse considerando la posible existencia de sesgos de memoria asociados al recuerdo de patrones de uso previos a la emergencia sanitaria.

Se observa un incremento de 18 puntos porcentuales en la frecuencia alta de uso, que pasó de 28 % (84 usuarios) en el periodo prepandemia a 46 % (138 usuarios) en la etapa postpandemia, lo que representa un aumento de 54 personas. De manera complementaria, la frecuencia baja se redujo de 30 % (90 usuarios) a 16 % (48 usuarios), equivalente a una disminución de 42 personas, evidenciando una mayor incorporación de los usuarios al uso frecuente de los espacios públicos en Quito.

3.2. Transformación en los patrones de actividad

Los datos muestran una distribución diferenciada de actividades realizadas en el espacio público de acuerdo con lo señalado por los 300 usuarios (Tabla 5).

Tabla 5. Actividades principales.

Actividad	Porcentaje	n
Recreación	32 %	96
Ejercicio	27 %	81
Socialización	25 %	75
Cultural	10 %	30
Otros	6 %	18
Total	100 %	300

Las actividades de ejercicio físico (81 usuarios) y recreativas (96 usuarios) presentan la mayor proporción, alcanzando un total de 177 usuarios, lo que representa el 59 % de la muestra. Este hallazgo avala la preeminencia de costumbres ligadas al bienestar en la utilización del espacio público.

El estudio de las 20 entrevistas semiestructuradas realizadas a usuarios de espacios públicos en Quito facilitó la identificación de patrones discursivos y categorías emergentes que enriquecen los resultados cuantitativos. A través del proceso de codificación abierta y análisis temático, se identificaron dos dimensiones analíticas generales (percepción del espacio público y diseño urbano), dentro de las cuales emergieron diversas categorías y subcategorías derivadas del proceso de codificación abierta.

Tabla 6. Categorías emergentes del análisis cualitativo.

Categoría	Código	Frecuencia
Seguridad	Vigilancia	14
Seguridad	Iluminación	12
Calidad espacial	Limpieza	16
Calidad espacial	Mantenimiento	13
Diseño urbano	Equipamiento	17
Diseño urbano	Accesibilidad	15
Apropiación	Permanencia	11
Apropiación	Actividades recreativas	14

El análisis cualitativo (Tabla 6.) permitió identificar categorías recurrentes relacionadas con seguridad, calidad espacial, diseño urbano y apropiación social del espacio. Los códigos más frecuentes estuvieron asociados al equipamiento urbano, limpieza, accesibilidad y percepción de seguridad, aspectos que también fueron destacados en los resultados cuantitativos. Algunas expresiones de los participantes fueron:

"La iluminación y la presencia constante de personas hacen que me sienta más seguro al permanecer en el parque" (Entrevistado 7).

"Después de la pandemia utilizo más estos espacios porque me permiten realizar actividad física al aire libre" (Entrevistado 12).

"Cuando existen áreas bien mantenidas y equipadas, uno permanece más tiempo en el lugar" (Entrevistado 18).

3.3. Percepción del espacio público

Los resultados de percepción muestran variaciones entre los distintos atributos evaluados como fueron seguridad, limpieza e iluminación, estas variaciones permiten identificar cuáles son los factores mejor valorados por los usuarios y cuáles constituyen limitaciones para el uso de los espacios públicos (Tabla 7).

Tabla 7. Percepción de variables urbanas.

Variable	Alta (%)	Media (%)	Baja (%)
Seguridad	50	32	18
Limpieza	58	27	15
Iluminación	55	30	15

La limpieza presenta el mayor porcentaje de valoración positiva, mientras que la seguridad registra el mayor porcentaje de valoración negativa.

3.4. Influencia del diseño urbano

Los resultados cuantitativos muestran diferencias en la valoración de los componentes del diseño urbano seleccionados para el presente estudio como lo son Equipamiento, Accesibilidad y Flexibilidad. (Tabla 8).

Tabla 8. Influencia del diseño urbano en el uso del espacio público.

Elemento	Media (1–5)	Desviación estándar	Impacto
Equipamiento	4,6	0,52	Muy alto
Accesibilidad	4,2	0,64	Alto
Flexibilidad	4,1	0,67	Alto

Los valores corresponden a promedios obtenidos a partir de una escala tipo Likert de 1 a 5 aplicada a los usuarios de espacios públicos en Quito, donde 1 representa una valoración muy baja y 5 una valoración muy alta. La clasificación del impacto se estableció en función de los rangos de media: 4,5-5,0 (muy alto), 3,5-4,4 (alto), 2,5-3,4 (medio), 1,5-2,4 (medio bajo), 0 – 1,4 (bajo).

La desviación estándar refleja el grado de dispersión de las respuestas de los usuarios en relación con la media obtenida para cada elemento del diseño urbano, en el caso de los espacios públicos analizados en Quito, los valores registrados (entre 0,52 y 0,67) indican una baja dispersión, lo que evidencia un alto nivel de consenso entre los usuarios en la valoración de los componentes evaluados.

Con el fin de identificar diferencias territoriales entre los espacios públicos analizados, se realizó una comparación de indicadores (Tabla 9), asociados con frecuencia de uso, percepción de seguridad, calidad espacial, accesibilidad y equipamiento urbano.

Los resultados evidencian diferencias territoriales entre los espacios públicos analizados. Los parques metropolitanos y recreativos consolidados, como La Carolina y Guangüiltagua, registran mayores niveles de uso, percepción de seguridad y valoración de calidad espacial. En contraste, los espacios localizados en sectores con menores niveles de equipamiento presentan valoraciones inferiores en la mayoría de los indicadores.

Tabla 9. Comparación de indicadores por espacio público.

Espacio público	Frecuencia alta (%)	Seguridad positiva (%)	Calidad espacial (%)	Accesibilidad (1-5)	Equipamiento (1-5)
Parque Metropolitano Guanguiltagua	58	63	68	4,5	4,8
Parque Chillogallo	39	42	46	3,9	4,0
Plaza Sucre	44	47	52	4,2	4,1
Parque Lineal Mena Dos	41	45	48	4,0	4,0
Parque La Carolina	61	65	72	4,7	4,9
Parque El Tiempo	33	38	43	3,8	3,9

4. DISCUSIÓN

4.1. Alteraciones en la frecuencia de empleo

El cambio de variable notable en la frecuencia de uso del espacio público, al comparar el periodo prepandemia (2018–2019) con la etapa postpandemia (2022–2024) no se debe interpretarse únicamente como un incremento en términos cuantitativos, sino como una modificación estructural en la relación entre los ciudadanos y su entorno urbano. En este nuevo escenario, el espacio público deja de ser un lugar de uso ocasional para consolidarse como un componente cotidiano de la vida urbana, asociado no solo a actividades recreativas, sino también a dinámicas de bienestar, encuentro social y permanencia prolongada en espacios abiertos. Esta transformación coincide con tendencias observadas en otros contextos urbanos internacionales, donde los espacios abiertos adquirieron una mayor relevancia dentro de las estrategias de adaptación social posteriores a la pandemia [4].

El incremento en la frecuencia alta de uso, que va del 28 % en el periodo anterior a la pandemia al 46 % posterior a ella sugiere que los usuarios han integrado el espacio público en su rutina cotidiana. Los resultados apuntan a que este comportamiento podría estar asociado con una mayor valoración de los espacios abiertos para el bienestar físico y mental, así como con cambios en las dinámicas de interacción social posteriores a los periodos de confinamiento [16]. Por otro lado, la frecuencia baja experimenta una disminución importante en 14 puntos porcentuales, lo que señala una reducción notable en el conjunto de usuarios que empleaban el espacio público de forma ocasional o restringida. Este descenso puede ser entendido como un proceso de activación del espacio público, en el que personas que antes no lo utilizaban frecuentemente han aumentado su participación. Además, es posible que este resultado esté relacionado con modificaciones en la percepción del riesgo, la necesidad de áreas abiertas durante y después de la pandemia, o el ajuste de los usuarios a nuevas maneras de interactuar socialmente en ambientes urbanos.

Los resultados sugieren una tendencia hacia una utilización más intensiva del espacio público, caracterizada por la incorporación progresiva de usuarios que anteriormente presentaban frecuencias de uso medias o bajas. Este comportamiento refleja una transformación en la función que cumplen estos espacios dentro de la vida urbana, consolidándolos como componentes relevantes para el bienestar, la recreación y la interacción social en el contexto postpandemia.

4.2. Transformación en los patrones de actividad

Se observa un cambio en la naturaleza de las actividades que predominan en el espacio público, evidenciando una tendencia clara hacia aquellas relacionadas con el bienestar físico, mental y social. Este cambio no solo representa las preferencias de los usuarios, sino que también muestra una nueva concepción del espacio público y su uso en el contexto postpandemia en Quito, dejando de ser solamente un sitio de encuentro ocasional o tránsito y se establece como un entorno activo donde la salud y el ocio son protagonistas.

La información muestra que el 32 % de las actividades son recreativas y el 27 % físicas, sugiriendo una tendencia hacia la utilización del espacio público como soporte para prácticas relacionadas con el bienestar general. Este comportamiento puede ser entendido como una reacción a las consecuencias del confinamiento, además de a un mayor entendimiento acerca de lo relevante que es hacer ejercicio y tener contacto con el ambiente abierto para la salud. También, el hecho de que haya un número importante de usuarios haciendo ejercicios indica que los espacios públicos han tomado responsabilidades que antes eran propias de instalaciones cerradas como centros deportivos o gimnasios. Esto denota la multifuncionalidad de estos lugares y su importante crecimiento en la vida urbana actual. En cuanto a la socialización (25 %), a pesar de seguir siendo una actividad importante, se observan transformaciones significativas en sus dinámicas. Estas han pasado de interacciones masivas y concentradas propias del periodo prepandemia a encuentros más dispersos, con grupos más pequeños y con mayor dispersión geográfica, lo que podría estar asociado con nuevas condiciones de percepción del riesgo y una apreciación más alta del espacio personal [17]. Las actividades culturales, por otro lado, tienen una participación más baja (10 %), probablemente debido a que la organización de eventos ha disminuido o a las restricciones en la programación cultural después de la pandemia. No obstante, su presencia corrobora que el espacio público sigue teniendo un papel relevante como escenario para la expresión colectiva y cultural, aunque con menos vigor.

Estos resultados sugieren un cambio hacia una utilización más activa, extendida y funcional del espacio público, en la que predominan actividades que requieren de una mayor permanencia y apropiación del espacio. Esta transformación permite observar que el espacio público ha adquirido un mayor protagonismo en la vida urbana, exigiendo condiciones apropiadas de diseño, equipamiento y gestión que se ajusten a estas nuevas dinámicas de utilización.

Resultados similares fueron evidenciados por Marino Zamudio et al. [18], quienes señalan que la pandemia promovió una revalorización de los espacios públicos en ciudades latinoamericanas como Quito, Bogotá y Ciudad de México, destacando su función en la cohesión social, el bienestar urbano y la implementación de intervenciones temporales orientadas a mejorar la habitabilidad y la resiliencia de los entornos urbanos.

4.3. Percepción del espacio público

Uno de los resultados más significativos de la investigación es el impacto decisivo que tiene la percepción en los procesos de apropiación del espacio público, sugiriendo que la vivencia subjetiva de los usuarios puede ser tan importante como las condiciones físicas objetivas del entorno. Los hallazgos en el Distrito Metropolitano de Quito indican que elementos tales como la limpieza, la luz y la seguridad no solo afectan la calidad de vivir en una ciudad, sino que también tienen un impacto directo en la elección de uso, permanencia y repetición en esos lugares. Esto indica que el espacio público no puede comprenderse solamente desde un punto de vista material, sino también como un ambiente que se percibe e interpreta en términos sociales, donde las sensaciones de control, confianza y confort son determinantes para su apropiación.

El análisis muestra que la limpieza (58 %) y la iluminación (55 %) tienen los índices más elevados de valoración positiva, lo que señala que los usuarios aprecian avances o condiciones apropiadas en estos elementos dentro de las áreas evaluadas. No obstante, la seguridad percibida

(50 %) aparece como uno de los factores más valorados por los usuarios encuestados, por lo que los resultados sugieren una posible relación entre la percepción de seguridad y la decisión de uso del espacio público. En este contexto, a pesar de que un lugar pueda tener buenas condiciones físicas, si no es percibido como seguro, su grado de apropiación se reduce. Se refuerza este dato al notar que el 18 % de los usuarios califica la seguridad como insuficiente, cifra más alta que otras variables negativas, lo cual indica que en ciertos sectores urbanos se mantienen percepciones de riesgo.

Desde un punto de vista analítico, los hallazgos descriptivos indican una posible relación entre la percepción y el comportamiento de los usuarios, donde la calidad percibida podría actuar como un factor asociado a la utilización del espacio público. La seguridad percibida aparece como un factor relevante que podría estar asociado con la frecuencia de uso, el tipo de actividades desarrolladas y el tiempo de permanencia de los usuarios. Los resultados sugieren que aspectos como la iluminación y el mantenimiento adecuado podrían contribuir a fortalecer la sensación de seguridad de los usuarios. Por lo tanto, estos resultados indican que las intervenciones en el espacio público deben ir más allá de la esfera física y adoptar métodos integrales de gestión urbana, como el fortalecimiento de la vigilancia, la activación de los espacios a través de una programación de actividades y la promoción del control social informal. Estas acciones pueden mejorar, junto con un diseño urbano apropiado, la percepción de seguridad y aumentar así los niveles de apropiación del espacio público. Esto concuerda con lo mencionado en investigaciones anteriores acerca del urbanismo y la percepción medioambiental [19].

4.4. Incidencia en el diseño urbano

Los hallazgos descriptivos indican que la calidad, diversidad e intensidad de uso del espacio público podrían estar asociadas con determinadas características del diseño urbano. Estos resultados sugieren que el diseño urbano constituye un elemento relevante dentro de las dinámicas sociales observadas en los espacios públicos analizados. De igual forma, los datos permiten observar que determinadas características del diseño urbano podrían influir en la manera en que los usuarios perciben y utilizan el espacio público. Se observa una posible relación entre las condiciones de diseño urbano y la diversidad de actividades, así como con los niveles de permanencia y utilización del espacio. Bajo este criterio, los espacios que presentan mejores condiciones de diseño registran mayores niveles de uso y valoración por parte de los usuarios encuestados.

La Tabla 9 muestra que el equipamiento urbano registra la valoración promedio más alta entre los componentes analizados, lo que evidencia la importancia que los usuarios le atribuyen dentro de su experiencia en el espacio público. Esto se debe a su habilidad para facilitar ciertas actividades, tales como el ejercicio, la recreación infantil o el descanso. Estas actividades aumentan no solo la diversidad de los usuarios, sino también su permanencia. La accesibilidad, con un impacto “alto”, también se establece como un elemento importante, pues constituye una condición relevante para facilitar el acceso y utilización del espacio público por parte de distintos grupos de población; entre ellos se encuentran los niños, las personas de edad avanzada y aquellas con movilidad reducida. En esta línea, los resultados sugieren que los espacios con mejores condiciones de accesibilidad podrían favorecer una utilización más amplia e inclusiva.

La flexibilidad espacial, que también cuenta con una valoración "alta", es relevante en el entorno postpandemia, pues podría favorecer la adaptación del espacio a diferentes actividades y modalidades de uso. Los espacios versátiles muestran condiciones que podrían facilitar una mejor adaptación a cambios en las dinámicas sociales. Este rasgo permite que diferentes usos coexistan sin conflictos de espacio, lo cual favorece una ocupación del medio urbano más variada y eficaz.

Los resultados descriptivos muestran que, desde un punto de vista integrado, los espacios con mejores valoraciones en equipamiento, accesibilidad y flexibilidad presentan mayores niveles de uso y diversidad de actividades. Esta tendencia sugiere que determinadas características del

diseño urbano podrían favorecer condiciones más adecuadas para responder a las necesidades cambiantes de los usuarios y a la diversidad de actividades desarrolladas en el espacio público. Por lo tanto, estos descubrimientos subrayan la importancia de implementar estrategias de diseño que se enfoquen en el usuario y que den prioridad a criterios de calidad espacial, adaptabilidad e inclusión, tal como indican investigaciones urbanísticas recientes [20].

5. CONCLUSIONES

Según los hallazgos de la investigación, el espacio público se ha consolidado como un elemento estructural fundamental del entorno urbano postpandemia, trascendiendo su función tradicional de recreación y tránsito para convertirse en una infraestructura estratégica vinculada al bienestar físico, la salud mental y la cohesión social. El incremento en la frecuencia de uso y la diversidad de actividades desarrolladas evidencia una mayor incorporación de estos espacios a la vida cotidiana de la población, fortaleciendo su papel como soporte para la interacción social, la recreación y el desarrollo de dinámicas urbanas más inclusivas y resilientes.

La perspectiva de los ciudadanos se consolida como un elemento crucial en los procesos de apropiación del espacio público. Factores como la limpieza, la seguridad percibida y la calidad ambiental se identifican como aspectos relevantes en la experiencia de los usuarios y podrían estar asociados con las decisiones de uso y permanencia en el espacio público [19]. Este hallazgo sugiere que la calidad del espacio público no puede evaluarse únicamente desde criterios físicos, sino que debe integrar dimensiones subjetivas vinculadas a la experiencia urbana.

Los resultados sugieren que los usuarios otorgan una valoración favorable a componentes del diseño urbano como la accesibilidad, el equipamiento y la flexibilidad espacial, los cuales podrían estar asociados con mayores niveles de uso y apropiación del espacio público. La accesibilidad, el equipamiento y la flexibilidad espacial se identifican como atributos altamente valorados por los usuarios y potencialmente vinculados a procesos de apropiación del espacio público. En este sentido, el diseño urbano debe ser entendido como una herramienta estratégica capaz de responder a las demandas cambiantes de la sociedad, especialmente en contextos de incertidumbre como el escenario postpandemia [20].

Por otro lado, el análisis evidencia la persistencia de desigualdades territoriales en la calidad, accesibilidad y uso del espacio público en Quito. Estas diferencias responden a condiciones estructurales del desarrollo urbano, donde algunos sectores presentan mejores infraestructuras y mantenimiento, mientras otros evidencian carencias. Esta situación plantea retos importantes para la planificación urbana en términos de equidad y sostenibilidad, haciendo necesario promover políticas públicas orientadas a la redistribución y mejora de estos espacios en sectores históricamente desfavorecidos [3], [8], [21].

Por ello, se establece que el diseño y la gestión del espacio público en la época postpandemia deben dirigirse hacia modelos más inclusivos, resilientes y flexibles, que tengan la capacidad de reaccionar ante futuras crisis y nuevas dinámicas sociales, en concordancia con las recomendaciones internacionales para el fortalecimiento de los espacios públicos como elementos estratégicos para la sostenibilidad urbana [22]. En este contexto, la percepción ciudadana debe constituirse como eje central del proceso de planificación, integrando aspectos objetivos y subjetivos en la toma de decisiones, consolidando al espacio público como un componente clave para el desarrollo de ciudades más sostenibles, equitativas y centradas en el bienestar.

El estudio aporta hallazgos empíricos sobre los cambios experimentados en el uso y valoración del espacio público en Quito durante el periodo postpandemia, destacando la importancia de factores como la accesibilidad, el equipamiento urbano, la calidad espacial y la percepción de seguridad en la experiencia de los usuarios, los cuales fueron consistentemente valorados de manera positiva por la población encuestada.

Entre las principales limitaciones de la investigación se encuentran el uso de un muestreo no probabilístico y la incorporación de información retrospectiva auto reportada para comparar periodos prepandemia y postpandemia, aspectos que pueden afectar la generalización de los resultados. En futuras investigaciones se concluye desarrollar estudios longitudinales, ampliar el tamaño de la muestra y aplicar análisis estadísticos inferenciales que permitan evaluar de manera más robusta las relaciones entre diseño urbano, percepción ciudadana y uso del espacio público en diferentes contextos urbanos.

Los resultados constituyen una base de referencia para futuras investigaciones sobre espacio público en ciudades latinoamericanas. No obstante, la aplicación de este enfoque en otros contextos requiere procesos adicionales de validación metodológica y adaptación a las particularidades territoriales de cada ciudad.

REFERENCIAS

- [1] J. Gehl, *Cities for People*. Washington, DC, USA: Island Press, 2010. [En línea]. Disponible: <https://islandpress.org/books/cities-people>
- [2] S. Low y N. Smith, *The Politics of Public Space*. New York, NY, USA: Routledge, 2006. [En línea]. Disponible: <https://www.routledge.com/The-Politics-of-Public-Space/Low-Smith/p/book/9780415951395>
- [3] N. Cuví y L. C. Gómez Vélez, “Los parques urbanos de Quito: distribución, accesibilidad y segregación espacial”, *Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science*, vol. 10, no. 2, pp. 200–231, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.21664/2238-8869.2021v10i2.p200-231>.
- [4] J. Honey-Rosés, I. Anguelovski, V. K. Chireh, C. Daher, C. Konijnendijk van den Bosch, J. S. Litt, V. Mawani, M. T. McCall, A. Orellana, E. Oscilowicz, U. Sánchez, M. Senbel, X. Tan, E. Villagomez, O. Zapata y W. J. Nieuwenhuijsen, “The impact of COVID-19 on public space: An early review of the emerging questions – design, perceptions and inequities”, *Cities & Health*, vol. 5, no. 1, pp. S263–S279, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/23748834.2020.1780074>.
- [5] D. Rojas-Rueda, E. Vaught y D. Buss, “Why a New Research Agenda on Green Spaces and Health Is Needed in Latin America: Results of a Systematic Review”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, no. 11, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijerph18115839>.
- [6] P. C. Muñoz-Vanegas, M. A. Quizhpe-Marín y X. Salazar-Guamán, “Uso y percepción del espacio público, una mirada desde la población: el caso de Cuenca, Ecuador”, *Revista de Urbanismo*, no. 41, pp. 1–18, 2019. doi: 10.5354/0717-5051.2019.53536. [En línea]. Disponible en: <https://revistaurbanismo.uchile.cl/index.php/RU/article/view/53536>
- [7] UN-Habitat, “*Global Public Space Toolkit: From Global Principles to Local Policies and Practice*”. Nairobi, Kenya: United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat), 2015. [En línea]. Disponible en: <https://unhabitat.org/sites/default/files/2019/10/global-public-space-toolkit-from-global-principles-to-local-policies-and-practice.pdf>
- [8] E. Molina Velásquez, P. Mamarandi Mossot, P. Villagrán Olivo, J. Torres Sarabia y T. Azúa Cañarte, “El consumo del ocio post Covid-19. Caso de estudio: Quito Urbano - Distrito Metropolitano de Quito”, *Revista Universitaria de Geografía*, vol. 33, no. 1, pp. 143–180, 2024, doi: 10.52292/j.rug.2024.33.1.0071. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.uns.edu.ar/rug/article/view/4517>

- [9] G. M. Navarro Narváez, *Las zonas verdes urbanas en la Ciudad de Quito: Un análisis de las percepciones sociales de los servicios ecosistémicos de sus usuarios. Caso parque "Las Cuadras"*. Tesis de maestría, Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO Ecuador), Quito, Ecuador, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.flacsoandes.edu.ec/items/3d49291e-6f21-4def-b3b5-311c1e1b624a>
- [10] M. van den Berg, W. Wendel-Vos, M. van Poppel, H. Kemper, W. van Mechelen y J. Maas, "Health benefits of green spaces in the living environment: A systematic review of epidemiological studies", *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 14, no. 4, pp. 806–816, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.07.008>.
- [11] A. Sharifi y A. R. Khavarian-Garmsir, "The COVID-19 pandemic: Impacts on cities and major lessons for urban planning, design and management", *Science of the Total Environment*, vol. 749, Art. no. 142391, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142391>
- [12] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado y M. del P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*, 6.^a ed. Ciudad de México, México: McGraw-Hill Education, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>
- [13] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), VIII Censo de Población y VII de Vivienda 2022: Resultados. Quito, Ecuador: INEC, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>.
- [14] Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, *Plan Metropolitano de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PMDOT 2024–2033)*. Quito, Ecuador, 2024. [En línea]. Disponible: <https://zonales.quito.gob.ec/wp-content/uploads/PMDOT-2024-2033.pdf>
- [15] Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, *Plan de Uso y Gestión de Suelo del Distrito Metropolitano de Quito (PUGS)*. Quito, Ecuador, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www7.quito.gob.ec/mdmq_ordenanzas/Administraci%C3%B3n%202019-2023/Ordenanzas/2021/ORD-001-2021-PMDOT-PUGS/Ordenanza%20PMDOT-PUGS-001-2021.pdf
- [16] Empresa Pública Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas, *Informe de gestión y estado del espacio público en el Distrito Metropolitano de Quito*. Quito, Ecuador, 2020. [En línea]. Disponible: https://www7.quito.gob.ec/mdmq_ordenanzas/Administraci%C3%B3n%202019-2023/Comisiones%20del%20Concejo%20Metropolitano/Presupuesto,%20Finanzas%20y%20Tributaci%C3%B3n/2021/2021-09-24/Documentos%20para%20tratamiento/1/Respuestas/S.G.Planificaci%C3%B3n/GADD MQ-SGP-2021-0692-O/informe_de_gesti%C3%B3n.pdf
- [17] UN-Habitat, *Cities and Pandemics: Towards a More Just, Green and Healthy Future*. Nairobi, Kenya: United Nations, 2021. [En línea]. Disponible: <https://unhabitat.org/cities-and-pandemics-towards-a-more-just-green-and-healthy-future-0>
- [18] R. A. Marino, E. Vargas y M. Flores, "Impacts of COVID-19 Lockdown Restrictions on Housing and Public Space Use and Adaptation: Urban Proximity, Public Health, and Vulnerability in Three Latin American Cities", en *COVID-19 Pandemic, Geospatial Information, and Community Resilience: Global Applications and Lessons*, Routledge, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1201/9781003181590-31>.
- [19] V. Mehta, "Evaluating Public Space", *Journal of Urban Design*, vol. 19, no. 1, pp. 53–88, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/13574809.2013.854698>.

- [20] M. Carmona, T. Heath, T. Oc y S. Tiesdell, *Public Places, Urban Spaces: The Dimensions of Urban Design*, 2nd ed. Oxford, UK: Architectural Press, 2010. [En línea]. Disponible en: https://openlibrary.org/works/OL20432661W/Public_Places_Urban_Spaces_Second_Edition
- [21] ONU-Hábitat, *El espacio público: componente clave de una ciudad sostenible*. Nairobi, Kenya: United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat), 2018. [En línea]. Disponible en: <https://onu-habitat.org/index.php/el-espacio-publico-componente-clave-de-una-ciudad-sostenible>
- [22] UN-Habitat, *Global Public Space Programme Annual Report*. Nairobi, Kenya: United Nations Human Settlements Programme, 2023. [En línea]. Disponible: <https://unhabitat.org/global-public-space-programme-annual-report-2023>





Más artículos científicos aquí