



Regina Pacis

Revista Sapientia Postgraduate

Volumen 2, Número 1. Mayo 2026.

Regina Pacis Revista Sapiencia Postgraduate

Volumen 2, Número 1. 2026.

Índice

Consejo Editorial

Directora general

Dra Suyapa Bejarano
Dirección de Investigación Científica e Innovación,
Universidad Católica de Honduras, San Pedro Sula, Honduras
direccion.dici@unicah.edu

Editor en Jefe, Sapiencia Postgraduate

Dr. Jaime Núñez 
PhD en Lingüística Inglesa Aplicada
Universidad Católica de Honduras
San Pedro Sula, Honduras
jnunez@unicah.edu

Editores Asociados

Dra. Alba Luz Zelaya Guardado 
azelaya@unicah.edu
Dirección de Postgrado, Universidad Católica de Honduras,
San Pedro Sula, Honduras

Dra. Tirza Maribel Solórzano Nuñez 
tsolorzano@unicah.edu
Facultad de Ciencias Administrativas, Universidad Católica
de Honduras, Tegucigalpa MDC, Honduras

Dra. Nuzli Montes de Oca Rosales 
nmontesr@unicah.edu
Facultad de Gestión Estratégica de Empresas, Universidad
Católica de Honduras, San Pedro Sula, Honduras

Dra. Vilma Odessa Zelaya Guardado 
vodessa@unicah.edu
Facultad de Psicología, Universidad Católica de Honduras,
San Pedro Sula, Honduras

Revisión y redacción de texto

Licda. Daysi Yamileth Velásquez Perdomo
Facultad de Estudios Generales.
Universidad Católica de Honduras, Tegucigalpa MDC.
Correo: dyvelasquez@unicah.edu

Plataforma Virtual

Ing Gerardo Tibaná
Scimago

Diseño digital

MEd. Flavio Flores
Diagramador
Correo: flavioflores@gmail.com

Imagen de Portada

Baruc Barahona
barahonaheber8@gmail.com
@artgallery_baruc
Artista y propietario

Artículo original Pg. 1

**Más allá de la memorización: percepciones estudiantiles
sobre aprendizaje significativo en la universidad**

Jairo Núñez Cáliz

Artículo original. Pg. 8

**Estrategias de resiliencia empresarial en la pequeña y
mediana empresa durante la pandemia de COVID-19 en
Tegucigalpa**

Tirza Solorzano - Ludwing Espinal - Lidia Raudales - Emily González -
Edwin Valladares

Artículo original. Pg. 13

**Hacia un marco contextualizado para la integración de
inteligencia artificial en la educación superior hondureña:
lecciones de la literatura internacional**

Carlo Menjivar Montes de Oca

Artículo original Pg.19

**De moléculas a sociedades complejas: las restricciones de
escala en la evolución a la complejidad**

Edwin Francisco Herrera

Serie de casos Pg. 28

Nasoangiofibroma juvenil y protocolo EMGS-MURILLO

Juan José Guifarro - Elmer Roberto Méndez

La Revista Sapiencia Postgraduate, ISSN Electrónico 3104-5111.
Órgano de difusión técnico-científica de la Universidad Católica de Honduras.
Es de acceso abierto, no cobra por publicidad, y su contenido está a
disposición de manera gratuita, bajo los términos de una licencia "Creative
Commons" Atribución-No Comercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0), que
permite al autor mantener los derechos patrimoniales sin restricciones.
Publicación semestral (Abril y Noviembre). Recibe artículos todo el año. Los
artículos recibidos son sometidos a revisión doble ciego por pares externos.

Revista Sapiencia Postgraduate
Revista de Posgrado de la Universidad Católica de Honduras, Honduras
Mayo del 2026.

Universidad Católica de Honduras
Fondo Editorial
Campus San José, Barrio Casa Mata, Tegucigalpa MDC, Honduras
Teléfono: +(504) 2238-6794.
revistas@unicah.edu
https://unicah.edu/
Edición, diseño y caratula: Fondo Editorial de la Universidad Católica de Honduras.

Correspondencia: Portal Regina Pacis
revistas@unicah.edu
Publicación semestral
Los trabajos firmados son de responsabilidad de los autores.
Prohibida la reproducción total o parcial de esta revista, por cualquier medio, sin
permiso expreso del Fondo Editorial.

eISSN: 3104-5111

Más allá de la memorización: percepciones estudiantiles sobre aprendizaje significativo en la universidad

Beyond memorization: student perceptions of meaningful learning in higher education

J. Jairo Núñez Cáliz^{1,2} 

Resumen

Pese a tres décadas de retórica sobre innovación educativa, la experiencia universitaria sigue tensionada entre la reproducción memorística y la promesa del aprendizaje significativo. Este estudio examina, desde la voz situada del estudiante, qué configuraciones pedagógicas activan el aprendizaje real en la universidad hondureña. Se aplicó una encuesta cualitativa con preguntas abiertas a 173 estudiantes universitarios de la Universidad Católica de Honduras (UNICAH), distribuidos en once campus y cinco departamentos del país, complementada con un análisis bibliométrico de 20 artículos indexados Q1-Q2 (2018-2026) sobre aprendizaje activo y significativo. El análisis siguió un diseño mixto secuencial exploratorio: codificación temática inductiva, frecuencia léxica y triangulación con literatura. Los resultados muestran que el 34.1 % de los estudiantes asocia el aprendizaje real con la aplicación práctica, el 17.3 % con dinámicas y participación, y el 9.8 % con ejemplos y casos reales; solo el 5.2 % menciona explicación docente o retroalimentación como vector primario. La memorización es reconocida como necesaria pero insuficiente cuando no se conecta con comprensión, aplicación o reflexión. Los hallazgos convergen con la evidencia internacional sobre la superioridad pedagógica del aprendizaje activo y sugieren cinco principios de rediseño: experiencia situada, evaluación auténtica, ritmo metacognitivo, retroalimentación formativa y mediación docente como diseñador de significado. Se discuten implicaciones para la docencia universitaria y para el diseño de tecnologías educativas asistidas por inteligencia artificial.

Palabras claves: aprendizaje significativo; educación superior; percepciones estudiantiles; memorización; aprendizaje activo; evaluación auténtica; pedagogía universitaria.

Abstract

Despite three decades of rhetoric on educational innovation, the university experience remains caught between rote reproduction and the promise of meaningful learning. This study examines, from the student's situated voice, which pedagogical configurations activate real learning in the Honduran university. A qualitative survey with open-ended questions was administered to 173 undergraduate students at the Universidad Católica de Honduras (UNICAH) across eleven campuses and five departments, complemented by a bibliometric review of 20 Q1-Q2 indexed papers (2018-2026) on active and meaningful learning. Analysis followed a sequential exploratory mixed-methods design: inductive thematic coding, lexical frequency, and literature triangulation. Results show that 34.1% of students associate real learning with practical application, 17.3% with active dynamics and participation, and 9.8% with examples and real cases; only 5.2% mention teacher explanation or feedback as a primary vector. Memorization is recognized as necessary but insufficient when disconnected from understanding, application, or reflection. Findings converge with international evidence on the pedagogical superiority of active learning and suggest five redesign principles: situated experience, authentic assessment, metacognitive pacing, formative feedback, and teacher mediation as designer of meaning. Implications are discussed for university teaching and for the design of AI-assisted educational technologies.

Keywords: meaningful learning; higher education; student perceptions; rote memorization; active learning; authentic assessment; university pedagogy.

1. INTRODUCCIÓN

La universidad contemporánea declara, con notable consistencia retórica, que el aprendizaje significativo es su horizonte pedagógico. Sin embargo, la experiencia situada de los estudiantes sugiere que una porción considerable de su tránsito formativo continúa anclada a prácticas de reproducción literal: memorizar fórmulas, repetir definiciones, recordar fechas, identificar respuestas correctas en exámenes diseñados para medir retención antes que comprensión (Samoshkina, 2024; Vargas-Hernández & Vargas-González, 2022). Esta tensión, lejos de ser un residuo cultural, opera como punto ciego del propio discurso de innovación educativa: se predica el pensamiento crítico mientras se evalúa con instrumentos que premian la fotocopiadora cognitiva.

1.1 La persistencia de la memorización en la educación universitaria

La evidencia internacional documenta una paradoja estructural. Los meta-análisis sobre aprendizaje activo muestran efectos consistentes y robustos sobre el desempeño académico, la motivación intrínseca y la retención (Freeman et al., 2014; Theobald et al., 2020); no obstante, la lección magistral expositiva permanece como modalidad dominante en buena parte de los programas universitarios (Hartikainen et al., 2019; Lombardi & Shipley, 2021). Bucklin et al. (2021) reportan que, incluso en contextos médicos donde se reconoce explícitamente el valor del aprendizaje activo, sólo aproximadamente la mitad de las actividades formativas lo incorporan de manera efectiva. Las razones aducidas son recurrentes: el aprendizaje activo exige preparación intensiva, gestión más fina del aula y reconfiguración del rol docente como diseñador de experiencia, no como transmisor de contenido (Martín-Alguacil et al., 2024).

Esta persistencia de la memorización no es neutra. Dubinsky y Hamid (2024), desde la neurociencia cognitiva, muestran que las estrategias de aprendizaje activo activan circuitos de aprendizaje por refuerzo y de procesamiento profundo cualitativamente distintos a los reclutados por la instrucción directa pasiva, con consecuencias sobre la retención a largo plazo y las habilidades de orden superior. Wang (2024) documenta, en educación superior, que la transición desde modalidades memorísticas hacia diseños de aprendizaje profundo se asocia con mejoras de aproximadamente quince puntos promedio en composición y rendimiento. La memorización, lejos de ser inocua, opera con un costo cognitivo y motivacional medible.

1.2 Aprendizaje significativo como horizonte pedagógico

La categoría de aprendizaje significativo, en su acepción ausubeliana clásica (Ausubel, 1968), describe el proceso por el cual el aprendiz integra información nueva en su estructura cognitiva previa, de modo no arbitrario y no literal. Esta integración requiere tres condiciones simultáneas: material potencialmente significativo, disposición del aprendiz para aprender significativamente, y conexión con conceptos previos relevantes (Novak, 2010). Bajo esa lente, lo opuesto al aprendizaje significativo no es la dificultad, sino la repetición desconectada de sentido.

Las lecturas contemporáneas amplían este marco. Vargas-Hernández y Vargas-González (2022) sostienen que el aprendizaje significativo en la universidad exige metodologías didácticas activas y diseño curricular orientado a problemas auténticos, no a inventarios de contenido. Bhardwaj et al. (2025) muestran que las estrategias centradas en el estudiante en posgrados científicos producen no sólo mejor rendimiento académico, sino artefactos científicos verificables, tales como publicaciones coautoradas con estudiantes. Berg y Lepp (2023), en enfermería, documentan que el aprendizaje centrado en el estudiante refuerza tanto la competencia técnica como la autonomía y la autorregulación.

La constante transversal es que el aprendizaje significativo se materializa cuando el aula deja de ser un espacio de transmisión y se reconfigura como un ecosistema de construcción de comprensión (Lombardi & Shipley, 2021).

1.3 Brecha de investigación

La literatura sobre aprendizaje significativo ha avanzado vigorosamente en dos planos: el teórico-conceptual (Ausubel, 1968; Novak, 2010) y el meta-analítico de efectos comparados (Deslauriers et al., 2019; Theobald et al., 2020). Existen, sin embargo, considerablemente menos estudios situados que pregunten a los propios estudiantes universitarios qué configuraciones pedagógicas reconocen como significativas, en su lenguaje, en sus términos y en su contexto. Trinidad (2019) y Wang y Zhang (2018) son excepciones notables, pero su trabajo se desarrolla en contextos asiáticos y filipinos, sin equivalente sistemático para América Latina y, particularmente, para universidades hondureñas que combinan masividad, modalidades híbridas, heterogeneidad infraestructural y altísima diversidad regional.

Esta brecha es relevante porque las recomendaciones pedagógicas derivadas de contextos del Norte global no se trasladan automáticamente a aulas con condiciones materiales, culturales y de modalidad distintas. La voz situada del estudiante hondureño constituye, por tanto, un input empírico necesario para diseñar prácticas pedagógicas y tecnologías educativas relevantes para la región.

1.4 Objetivo del estudio

El objetivo de este estudio es analizar las percepciones de los estudiantes universitarios hondureños sobre el aprendizaje significativo, identificando los elementos pedagógicos que asocian con experiencias de aprendizaje más profundas, aplicables y transformadoras, y contrastando esa voz situada con la literatura internacional reciente (2018–2026) sobre aprendizaje activo y significativo en educación superior.

1.5 Pregunta de Investigación

¿Cómo perciben los estudiantes universitarios hondureños el aprendizaje significativo, y qué factores distinguen, desde su experiencia, una práctica pedagógica significativa de una centrada en la memorización?

1.6 Contribución del estudio

El artículo aporta tres elementos articulados. Primero, evidencia empírica situada sobre las configuraciones pedagógicas que los estudiantes hondureños reconocen como vehículos de aprendizaje real. Segundo, una clasificación temática inductiva (seis categorías emergentes) que puede operar como instrumento descriptivo para investigaciones comparativas posteriores. Tercero, cinco principios de rediseño pedagógico contrastados contra la literatura internacional indexada en Q1–Q2, con valor práctico para repensar la docencia, la evaluación y el diseño de tecnologías educativas asistidas por inteligencia artificial.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Diseño de Investigación

El estudio adopta un diseño mixto secuencial exploratorio (Creswell & Plano Clark, 2018) de corte transversal, con énfasis dominante en el componente cualitativo. La fase cualitativa central, basada en una encuesta con preguntas abiertas, se articula con un análisis bibliométrico y léxico de la literatura indexada Q1–Q2 sobre aprendizaje activo y significativo (2018–2026). La elección del diseño responde a una decisión epistemológica: privilegiar la voz situada del estudiante, en su lenguaje, antes que imponer escalas preconcebidas que invisibilizarían categorías emergentes (Charmaz, 2014; Van Maanen, 2011).

2.2 Contexto del estudio

La investigación se desarrolla en la Universidad Católica de Honduras (UNICAH), institución privada con presencia en once campus distribuidos en cinco departamentos del país (Francisco Morazán, Atlántida, El Paraíso, Olancho, Comayagua y zonas asociadas). La muestra cubre programas de pregrado en ciencias sociales, salud, ingeniería, administración y humanidades, y comprende modalidad presencial, híbrida y semipresencial. Esta diversidad institucional y regional permite captar configuraciones pedagógicas heterogéneas dentro de una sola unidad académica.

2.3 Participantes

Participaron 173 estudiantes universitarios (74 mujeres y 99 hombres) seleccionados mediante muestreo no probabilístico intencional, con criterios de inclusión por carrera, año académico y campus. La distribución por año académico fue: primer año ($n = 20$; 11.6 %), segundo año ($n = 47$; 27.2 %), tercer año ($n = 40$; 23.1 %), cuarto año ($n = 29$; 16.8 %), quinto año ($n = 4$; 2.3 %) y sexto año ($n = 33$; 19.1 %). La edad mediana se ubica en los 20 años. La caracterización completa de la muestra se sintetiza en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización demográfica de la muestra estudiantil ($n = 173$)

Característica	Estudiantes ($n = 173$)
Sexo (M / F)	99 / 74
Edad (mediana)	20 años
UNICAH / externa	171 / 2
Campus principal	San Isidro (41 %)
Campus secundario	San Isidro-La Ceiba (30 %)
Año académico modal	2°-3° (50.3 %)
Departamentos cubiertos	5
Campus cubiertos	11

Nota. Elaboración propia con base en datos del estudio. Porcentajes calculados sobre $n = 173$.

2.4 Instrumento de recolección de datos

Se utilizó una encuesta con preguntas abiertas y semiestructuradas. Para los fines del presente artículo se priorizó el análisis de la pregunta P6 ("¿En qué momentos o actividades sientes que realmente aprendes?"), por su capacidad de elicitar percepciones espontáneas sobre el aprendizaje significativo sin imponer categorías a priori. La pregunta se diseñó siguiendo principios de la técnica del incidente crítico (Flanagan, 1954): el estudiante debe identificar episodios concretos donde reconoce aprendizaje genuino, lo que reduce la deseabilidad social asociada a respuestas declarativas sobre métodos pedagógicos.

Las dimensiones pedagógicas latentes que orientaron la lectura analítica posterior incluyeron: (i) comprensión profunda; (ii) relación con la vida real; (iii) participación activa; (iv) aplicación práctica; (v) evaluación orientada al razonamiento; (vi) rol del docente como mediador. Estas dimensiones operaron como sensitizing concepts (Charmaz, 2014), no como categorías de codificación impuestas.

2.5 Procedimiento

La encuesta se aplicó en formato digital durante el período académico correspondiente, con consentimiento informado

expresado al inicio del cuestionario, anonimización de respuestas, voluntariedad explícita y compromiso institucional de no asociar la participación a evaluaciones académicas. El tiempo promedio de respuesta fue de aproximadamente catorce minutos. La pregunta P6 generó respuestas de extensión variable, con una media de 53.4 caracteres y 9.1 palabras por respuesta, suficiente para análisis temático inductivo.

2.6 Estrategia de análisis

El análisis siguió un procedimiento mixto en cuatro etapas. Primero, lectura inmersiva de las 173 respuestas completas para identificar categorías emergentes (Gioia et al., 2013). Segundo, codificación temática inductiva con seis categorías estabilizadas tras dos rondas de saturación: aplicación práctica, dinámicas/juegos/participación, ejemplos/casos reales, explicación docente/retroalimentación, recursos visuales/audiovisuales, y otros. Tercero, análisis léxico de frecuencia de los términos relevantes (quince términos más frecuentes), con limpieza previa de palabras funcionales. Cuarto, triangulación con el corpus bibliométrico Q1-Q2: 20 artículos indexados (2018-2026) recuperados mediante búsqueda sistemática en bases académicas con la consulta "active learning AND meaningful learning AND higher education", filtrados por cuartil y relevancia temática.

Para asegurar rigor (Lincoln & Guba, 1985), el análisis incluyó: memos analíticos durante toda la codificación; revisión cruzada por un segundo codificador en una submuestra del 20 %; auditoría del trail de decisiones; y verificación de saturación al estabilizarse las seis categorías. La consistencia inter-codificador resultante ($\kappa = 0.79$) es satisfactoria para análisis cualitativo de respuestas breves.

2.7 Criterios éticos

El estudio se enmarca en el protocolo institucional aprobado por la Universidad Católica de Honduras (UNICAH-San Isidro). Se aplicaron los principios de consentimiento informado, anonimato, participación voluntaria y uso exclusivamente académico de los datos. Ninguna respuesta fue asociada a evaluaciones docentes ni a identificación de profesores. El instrumento, el libro de códigos final y los memos analíticos están disponibles bajo solicitud razonada, respetando los compromisos de anonimización con los participantes.

3.RESULTADOS

Los resultados se presentan en cuatro apartados articulados. Primero, el panorama bibliométrico de la literatura internacional reciente que sirve como marco comparativo (3.1). Segundo, la clasificación temática emergente de las percepciones estudiantiles (3.2). Tercero, el análisis léxico de los términos más frecuentes (3.3). Cuarto, la síntesis integrada de hallazgos por dimensión pedagógica (3.4).

3.1 Panorama bibliométrico: red conceptual del aprendizaje activo (2015-2025)

El mapa bibliométrico de coautorías y co-citaciones del corpus internacional revisado (Figura 1) muestra una red densamente conectada en torno a un cluster central. La literatura sobre aprendizaje activo, basado en problemas y experiencial converge metodológicamente entre 2018 y 2025, con nodos de alta centralidad correspondientes a estudios meta-analíticos y revisiones sistemáticas que articulan ingeniería, ciencias de la salud y educación general. La visualización confirma una tendencia: el campo se profesionaliza a partir de 2019 y la categoría de "aprendizaje significativo" se entrelaza progresivamente con la de "aprendizaje activo" en una sola conversación académica.

Tema emergente	Frecuencia
Aplicacion_practica	52
Otros	52
Dinamicas_juegos_participacion	30
Ejemplos_casos_reales	17
Explicacion_docente_retroalimentacion	9
Recursos_visuales_audiovisuales	3

4

Tabla 2. Síntesis integrada de hallazgos: dimensión pedagógica, descripción e implicación

Dimensión	Descripción	Implicación pedagógica
Aplicación práctica (34.1 %)	El estudiante reconoce aprendizaje al ejecutar, resolver y producir.	Diseñar tareas auténticas, no ejercicios reproductivos.
Dinámicas y participación (17.3 %)	El aula significativa se asocia a interacción, no a monólogo.	Romper centralidad expositiva; orquestar diálogo.
Ejemplos y casos (9.8 %)	La transferencia se ancla en escenarios contextualizados.	Incluir casos, escenarios profesionales y narrativas situadas.
Retroalimentación (5.2 %)	La voz docente es reconocida cuando media, pregunta y devuelve.	Privilegiar feedback formativo individualizado
Recursos audiovisuales (1.7 %)	Mención marginal; el medio no sustituye al diseño.	Usar recursos como soporte, no sustituto.
Memorización (implícita)	Aceptada como necesaria, rechazada como suficiente.	Rediseñar evaluación hacia comprensión y aplicación.

Nota. Elaboración propia con base en la codificación temática de las 173 respuestas a la pregunta P6.

Tres patrones cruzan la síntesis. Primero, la memorización no es rechazada de plano; es reconocida como condición necesaria pero estructuralmente insuficiente cuando no se conecta con comprensión, aplicación o reflexión. Segundo, la mediación docente es valorada cuando opera como diseño de experiencia y devolución formativa, no cuando se reduce a transmisión de contenidos. Tercero, la evaluación es el punto donde las contradicciones entre el discurso de innovación y la práctica institucional se vuelven más visibles: el estudiante percibe disonancia entre el énfasis declarado en el pensamiento crítico y los instrumentos que continúan premiando la retención literal.

4.DISCUSIÓN

4.1 De la reproducción de la información a la construcción de sentido

Los hallazgos confirman, en clave situada hondureña, la tesis ausubeliana clásica reformulada por la literatura contemporánea: el aprendizaje significativo emerge cuando el contenido deja de ser información para almacenar y se convierte en herramienta para comprender, decidir y actuar (Ausubel, 1968; Novak, 2010; Vargas-Hernández & Vargas-González, 2022). La concentración del 34.1 % en aplicación práctica, sumada al 17.3 % en dinámicas participativas y al 9.8 % en ejemplos reales, configura un patrón de más del 61 % del corpus orientado hacia configuraciones de aprendizaje activo. Este patrón es consistente con la evidencia meta-analítica internacional: Theobald et al. (2020) documentan que el aprendizaje activo reduce las brechas de rendimiento entre grupos subrepresentados en STEM en aproximadamente

un 33 %, y los efectos se intensifican cuando la implementación es de alta intensidad.

La voz estudiantil no rechaza todo contenido memorístico, pero percibe su insuficiencia cuando no hay comprensión ni aplicación. Esta lectura matizada es importante: el aprendizaje significativo no se construye contra la memoria, sino integrándola en estructuras de sentido más amplias (Sweller, 2011).

4.2 El aprendizaje significativo como experiencia situada

La recurrencia del término "vida real" en el corpus estudiantil (8 menciones) y la centralidad de las categorías "aplicación práctica" y "ejemplos reales" señalan que la significatividad no es una propiedad abstracta del contenido, sino una relación construida entre el contenido y el horizonte vital del estudiante. Bhardwaj et al. (2025) documentan esa misma dinámica en posgrados de ciencias moleculares: cuando el aula se reorienta hacia preguntas auténticas y problemas reales, el aprendizaje produce no sólo mejor rendimiento académico, sino artefactos verificables (publicaciones, propuestas, soluciones). Berg y Lepp (2023), en enfermería, encuentran un patrón equivalente: el aprendizaje centrado en el estudiante refuerza tanto la competencia técnica como la autorregulación.

Esta convergencia internacional con la voz estudiantil hondureña tiene implicación práctica: las metodologías activas no son una moda pedagógica del Norte global; son una respuesta documentada a una demanda transversal del aprendiz universitario que se manifiesta también en aulas masivas, híbridas y de recursos heterogéneos como las hondureñas.

4.3 La paradoja del esfuerzo cognitivo: aprendizaje activo y percepción

Un hallazgo de la literatura internacional merece especial atención por su relevancia para la interpretación de los resultados. Deslauriers et al. (2019) muestran experimentalmente que, en cursos universitarios de física, los estudiantes expuestos a aprendizaje activo aprenden objetivamente más que los expuestos a clases magistrales bien evaluadas, pero perciben subjetivamente que aprenden menos. La razón es que el esfuerzo cognitivo asociado al aprendizaje activo es leído inicialmente como signo de aprendizaje deficiente, no como evidencia de procesamiento profundo. Este desencuentro entre rendimiento real y percepción tiene implicaciones evaluativas serias: si la calidad docente se mide únicamente por encuestas de satisfacción estudiantil, los métodos pedagógicamente superiores pueden quedar sistemáticamente penalizados (Martín-Alguacil et al., 2024).

Los datos del presente estudio aportan un matiz importante a esta paradoja: cuando se le pregunta al estudiante en qué momentos siente que realmente aprende, las respuestas convergen masivamente con la práctica, la aplicación y la dinámica. Es decir, el estudiante reconoce cognitivamente las configuraciones activas como vehículos de aprendizaje genuino, aun cuando, en evaluaciones globales del curso, pueda reportar mayor satisfacción con clases magistrales pulidas. Esta divergencia entre el reconocimiento del mecanismo y la evaluación global del curso es, en sí misma, un objeto de investigación que merece desarrollos posteriores.

4.4 Implicaciones para la docencia universitaria

Cinco implicaciones prácticas se derivan articuladamente de los hallazgos. Primero, diseñar clases en torno a problemas auténticos y casos reales contextualizados al horizonte profesional del estudiante, en línea con la evidencia consolidada sobre aprendizaje basado en problemas (Hernández-de-Menéndez et al., 2019). Segundo, romper la centralidad del monólogo expositivo y orquestar dinámicas de interacción genuina que reconozcan al estudiante como agente activo del proceso (Bhardwaj et al., 2025; Lombardi & Shipley, 2021).

Tercero, integrar ejemplos, narrativas y escenarios reales como dispositivos de anclaje semántico, no como mera ilustración decorativa. Cuarto, privilegiar la retroalimentación formativa individualizada sobre la nota sumativa terminal. Quinto, recuperar la mediación docente como diseño de experiencia y devolución de sentido, no como transmisión de inventarios de contenido.

4.5 Implicaciones para la evaluación

Una pedagogía significativa exige coherencia evaluativa. No es defendible proclamar el pensamiento crítico como horizonte y, simultáneamente, evaluar exclusivamente con instrumentos que premian la retención literal de definiciones. La voz estudiantil del corpus es nítida al respecto: el 34.1 % asocia el aprendizaje real con aplicación práctica, pero el sistema institucional sigue evaluando, en buena medida, con instrumentos diseñados para medir reproducción. Esta brecha entre el horizonte declarado y la práctica evaluativa es, probablemente, una de las causas estructurales de la disonancia que el propio estudiantado reporta.

La evaluación auténtica (proyectos, casos, plenarias de juicio crítico, estudios aplicados, simulaciones) ofrece la coherencia que el rediseño pedagógico exige (Berg & Lepp, 2023; Hartikainen et al., 2019).

4.6 Implicaciones para el diseño de tecnologías educativas

Las plataformas educativas y los sistemas inteligentes asistidos por inteligencia artificial deben diseñarse para amplificar las configuraciones activas, no para reproducir digitalmente la lección magistral. Naseer et al. (2024) muestran que las rutas de aprendizaje personalizadas basadas en técnicas de deep learning mejoran significativamente el rendimiento, el compromiso y la satisfacción estudiantil respecto a entornos digitales tradicionales. Sin embargo, el principio de diseño que el presente estudio sostiene es más exigente: la tecnología educativa debe operar como validador del esfuerzo invisible del estudiante (lectura autónoma, práctica privada, autorregulación del ritmo) y como extensor del campo perceptivo docente, sin sustituir la mediación humana en los territorios de juicio crítico, evaluación auténtica y dimensión ética (Núñez Cáliz, 2026).

4.7 Contrucción teórica y práctica del estudio

El estudio aporta evidencia situada que articula la voz estudiantil hondureña con la literatura internacional Q1-Q2 sobre aprendizaje activo y significativo. La contribución es triple: (i) una clasificación temática inductiva de seis categorías que puede operar como instrumento descriptivo en investigaciones comparativas posteriores; (ii) una caracterización léxica del campo semántico del aprendizaje significativo desde la voz estudiantil; y (iii) cinco principios de rediseño pedagógico contrastados contra la evidencia internacional, con aplicabilidad inmediata en el diseño curricular, en la evaluación auténtica y en el desarrollo de tecnologías educativas asistidas por inteligencia artificial.

4.8 Limitaciones del estudio

Tres limitaciones deben reconocerse. Primero, la concentración institucional (99 % UNICAH) restringe la generalización inmediata a otras universidades hondureñas, particularmente públicas; el diseño longitudinal y multisitio del proyecto posdoctoral mayor abordará esa limitación. Segundo, los datos son autopercepciones del aprendizaje y no observaciones de la práctica situada; la triangulación con observación etnográfica de aulas y con métricas objetivas de rendimiento es una línea futura necesaria. Tercero, el análisis se concentra en la pregunta P6 del instrumento; aunque esta pregunta fue diseñada como pregunta-ancla, el corpus completo permite indagaciones adicionales que serán objeto de publicaciones posteriores.

4.9 Futuras líneas de investigación

Cinco líneas se abren a partir del presente estudio. Primero, replicación multisitio en universidades hondureñas públicas y privadas para examinar variabilidad institucional. Segundo, comparación entre carreras para identificar configuraciones pedagógicas dominantes por área disciplinar. Tercero, análisis longitudinal del vínculo entre aprendizaje significativo percibido y rendimiento académico verificable. Cuarto, estudios experimentales que prueben intervenciones de rediseño pedagógico fundadas en los cinco principios derivados. Quinto, exploración del papel específico de la inteligencia artificial como mediador de experiencias de aprendizaje significativo (Núñez Cáliz, 2026), tanto en su potencial como validador del esfuerzo invisible cuanto en sus riesgos de delegación cognitiva no examinada.

5.CONCLUSIONES

Los estudiantes universitarios hondureños perciben que el aprendizaje significativo ocurre cuando el conocimiento deja de ser información para almacenar y se convierte en herramienta para comprender, aplicar y resolver problemas situados. La aplicación práctica (34.1 %), las dinámicas participativas (17.3 %) y los ejemplos del mundo real (9.8 %) concentran más del 61 % de las menciones espontáneas sobre los momentos donde se reconoce aprendizaje genuino. La memorización no es rechazada; es reconocida como necesaria pero estructuralmente insuficiente cuando no se integra con comprensión, aplicación o reflexión.

Estos hallazgos situados convergen con la evidencia internacional indexada Q1-Q2 sobre la superioridad pedagógica del aprendizaje activo (Deslauriers et al., 2019; Freeman et al., 2014; Theobald et al., 2020) y sostienen la pertinencia, también en aulas hondureñas, de una transición pedagógica desde la transmisión de contenido hacia el diseño de experiencias auténticas, evaluadas con criterios de comprensión profunda.

El aporte distintivo del estudio es triple: una clasificación temática inductiva de las percepciones estudiantiles, una caracterización léxica del campo semántico del aprendizaje significativo, y cinco principios articulados de rediseño pedagógico – experiencia situada, evaluación auténtica, ritmo metacognitivo, retroalimentación formativa y mediación docente como diseñador de significado—con aplicabilidad inmediata en la docencia, la evaluación y el diseño de tecnologías educativas asistidas por inteligencia artificial.

Superar la memorización no implica abandonar el conocimiento, sino devolverle su función más importante: permitir que el estudiante piense, interprete y transforme su realidad.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Universidad Católica de Honduras (UNICAH), especialmente a la Dra. Rossana Ligerio, directora del campus San Isidro, por su enorme apreciación y valoración de la investigación científica como instrumento de mejora institucional y social; a los y las 173 estudiantes que aceptaron compartir su voz; a la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH) por el marco institucional del posdoctorado en Desarrollo Económico, Innovación y Gestión; y a Dataismo AI Technologies por el soporte analítico. Las opiniones expresadas son exclusivas del autor.

Declaración de conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses relevante para la presente investigación.

Disponibilidad de datos

El instrumento, el libro de códigos final, el corpus codificado y los memos analíticos están disponibles bajo solicitud razonada al correo de correspondencia, respetando los compromisos de anonimización con los participantes.

Referencias

- Ausubel, D. P. (1968). *Educational psychology: A cognitive view*. New York, NY: Holt, Rinehart and Winston.
- Berg, E., & Lepp, M. (2023). The meaning and application of student-centered learning in nursing education: An integrative review of the literature. *Nurse Education in Practice*, 71, 103622. <https://doi.org/10.1016/j.nepr.2023.103622>
- Bhardwaj, V., Zhang, S., Tan, Y. Q., & Pandey, V. (2025). Redefining learning: Student-centered strategies for academic and personal growth. *Frontiers in Education*, 10, 1518602. <https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1518602>
- Bucklin, B. A., Asdigian, N. L., Hawkins, J. L., & Klein, U. (2021). Making it stick: Use of active learning strategies in continuing medical education. *BMC Medical Education*, 21, 44. <https://doi.org/10.1186/s12909-020-02447-0>
- Charmaz, K. (2014). *Constructing grounded theory* (2nd ed.). Thousand Oaks, CA: SAGE Publications.
- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and conducting mixed methods research* (3rd ed.). Thousand Oaks, CA: SAGE Publications.
- Deslauriers, L., McCarty, L. S., Miller, K., Callaghan, K., & Kestin, G. (2019). Measuring actual learning versus feeling of learning in response to being actively engaged in the classroom. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(39), 19251-19257. <https://doi.org/10.1073/pnas.1821936116>
- Dubinsky, J. M., & Hamid, A. A. (2024). The neuroscience of active learning and direct instruction. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 163, 105737. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2024.105737>
- Flanagan, J. C. (1954). The critical incident technique. *Psychological Bulletin*, 51(4), 327-358. <https://doi.org/10.1037/h0061470>
- Freeman, S., Eddy, S. L., McDonough, M., Smith, M. K., Okoroafor, N., Jordt, H., & Wenderoth, M. P. (2014). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(23), 8410-8415. <https://doi.org/10.1073/pnas.1319030111>
- Gioia, D. A., Corley, K. G., & Hamilton, A. L. (2013). Seeking qualitative rigor in inductive research: Notes on the Gioia methodology. *Organizational Research Methods*, 16(1), 15-31. <https://doi.org/10.1177/1094428112452151>
- Hartikainen, S., Rintala, H., Pylväs, L., & Nokelainen, P. (2019). The concept of active learning and the measurement of learning outcomes: A review of research in engineering higher education. *Education Sciences*, 9(4), 276. <https://doi.org/10.3390/educsci9040276>
- Hernández-de-Menéndez, M., Vallejo Guevara, A., Tudón Martínez, J. C., Hernández Alcántara, D., & Morales-Menéndez, R. (2019). Active learning in engineering education: A review of fundamentals, best practices and experiences. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 13(3), 909-922. <https://doi.org/10.1007/s12008-019-00557-8>
- Lincoln, Y. S., & Guba, E. G. (1985). *Naturalistic inquiry*. Beverly Hills, CA: SAGE Publications.
- Lombardi, D., & Shipley, T. F. (2021). The curious construct of active learning. *Psychological Science in the Public Interest*, 22(1), 8-43. <https://doi.org/10.1177/1529100620973974>
- Martín-Alguacil, N., Avedillo, L., Mota-Blanco, R., & Gallego-Agúndez, M. (2024). Student-centered learning: Some issues and recommendations for its implementation in a traditional curriculum setting in health sciences. *Education Sciences*, 14(11), 1179. <https://doi.org/10.3390/educsci14111179>
- Naseer, F., Khan, M. N., Tahir, M., Addas, A., & Aeja, S. M. (2024). Integrating deep learning techniques for personalized learning pathways in higher education. *Heliyon*, 10(11), e32628. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32628>
- Novak, J. D. (2010). *Learning, creating, and using knowledge: Concept maps as facilitative tools in schools and corporations* (2nd ed.). New York, NY: Routledge.
- Núñez Cáliz, J. J. (2026). *Convergencia funcional, divergencia constitutiva: Jurisdicción docente, agencia estudiantil y aceptación de un sistema inteligente de apoyo en aulas universitarias hondureñas*. Tegucigalpa, Honduras: Dataismo AI Research Papers; Universidad Católica de Honduras.
- Samoshkina, I. (2024). Applied learning in higher education: Bridging the gap between theory and practice., 3, págs. 25-34. <https://doi.org/10.33422/icmetlv3i1.271>
- Sweller, J. (2011). Cognitive load theory. En *Psychology of learning and motivation* (Vol. 55, págs. 37-76). San Diego, CA: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387691-1.00002-8>
- Theobald, E. J., Hill, M. J., Tran, E., Agrawal, S., Arroyo, E. N., Behling, S., Chambwe, N., Cintrón, D. L., Cooper, J. D., Dunster, G., Grummer, J. A., Hennessey, K., Hsiao, J., Iration, N., Jones, L., Jordt, H., Keller, M., Lacey, M. E., Littlefield, C. E., & Freeman, S. (2020). Active learning narrows achievement gaps for underrepresented students in undergraduate science, technology, engineering, and math. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(12), 6476-6483. <https://doi.org/10.1073/pnas.1916903117>
- Trinidad, J. E. (2019). Understanding student-centred learning in higher education: Students' and teachers' perceptions, challenges, and cognitive gaps. *Journal of Further and Higher Education*, 44(8), 1013-1023. <https://doi.org/10.1080/0309877X.2019.1636214>
- Van Maanen, J. (2011). *Tales of the field: On writing ethnography* (2nd ed.). Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Vargas-Hernández, J. G., & Vargas-González, O. C. (2022). Strategies for meaningful learning in higher education. *Journal of Research in Instructional*, 2(1), 47-64. <https://doi.org/10.30862/jri.v2i1.41>
- Wang, J. (2024). A strategic study of using deep learning to improve the effectiveness of English education in colleges and universities. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 9(1), 1-15. <https://doi.org/10.2478/amns-2024-1776>
- Wang, S., & Zhang, D. (2018). Student-centred teaching, deep learning and self-reported ability improvement in higher education: Evidence from Mainland China. *Innovations in Education and Teaching International*, 57(5), 581-593. <https://doi.org/10.1080/14703297.2018.1490662>

Estrategias de resiliencia empresarial en la pequeña y mediana empresa durante la pandemia de COVID-19 en Tegucigalpa

Business resilience strategies for small and medium-sized enterprises during the COVID-19 pandemic in Tegucigalpa

Tirza Maribel Solórzano Núñez Ludwing Nelson Espinal Rodas Lidia Gabriela Raudales Godoy Emily Stephania González Reyes Edwin Camilo Valladares Reyes 

Resumen

Objetivo: Analizar las estrategias de resiliencia empresarial adoptadas por las pequeñas y medianas empresas (PYMES) en Tegucigalpa durante la pandemia de COVID-19. **Método:** Se empleó un enfoque cuantitativo, con alcance descriptivo correlacional y diseño no experimental transversal. La muestra estuvo conformada por 262 PYMES de Tegucigalpa. Se evaluaron cinco dimensiones de resiliencia: adaptabilidad y flexibilidad organizacional, capacidad de respuesta a crisis, innovación y aprendizaje organizacional, recursos financieros, y resiliencia personal del líder empresarial. **Resultados:** Los hallazgos indican asociaciones inversas débiles entre el sector y las dimensiones de resiliencia analizadas. Se identifican tendencias inversas significativas, aunque de magnitud limitada, específicamente en la capacidad de respuesta a crisis y los recursos financieros y estratégicos. Estos resultados sugieren la necesidad de profundizar en las interacciones entre las características del sector y las estrategias de resiliencia. **Conclusiones:** Los resultados obtenidos pueden orientar tanto al sector empresarial en el diseño de programas de fortalecimiento empresarial como a las instituciones gubernamentales en la formulación de políticas públicas para mejorar la resiliencia de las Pymes en Tegucigalpa, un sector clave para la economía hondureña.

Palabras clave: estrategias, resiliencia empresarial, pequeñas empresas, medianas empresas, pandemia COVID-19

Abstract

Objective: To analyze the business resilience strategies adopted by small and medium-sized enterprises (SMEs) in Tegucigalpa during the COVID-19 pandemic. **Method:** A quantitative approach was employed, featuring a descriptive-correlational scope and a non-experimental, cross-sectional design. The sample consisted of 262 SMEs in Tegucigalpa. Five dimensions of resilience were evaluated: organizational adaptability and flexibility, crisis response capacity, innovation and organizational learning, financial resources, and the business leader's personal resilience. **Results:** The findings indicate weak inverse associations between the business sector and the resilience dimensions analyzed. Significant inverse trends—albeit of limited magnitude—were identified, specifically regarding crisis response capacity and financial and strategic resources. These results suggest a need for further study into the interactions between sector characteristics and resilience strategies. **Conclusions:** The results can guide the business sector in designing capacity-building programs and assist government institutions in formulating public policies aimed at enhancing the resilience of SMEs in Tegucigalpa, a key sector for the Honduran economy.

Keywords: strategies, business resilience, small enterprises, medium enterprises, COVID-19 pandemic

Introducción

La pandemia COVID-19 representa para Honduras, un punto de inflexión que impacta al sector de las PYMES en Tegucigalpa. Estas organizaciones se han visto forzadas a operar en un entorno variable que ponen a prueba su capacidad de adaptación y resiliencia. En el ámbito empresarial hondureño, “la interacción con competidores, proveedores y otros emprendimientos fortalece las competencias necesarias para la supervivencia” (Miranda, 2020, p. 46). Por lo tanto, el contexto actual demanda una comprensión profunda sobre los mecanismos que permiten a las PYMES afrontar o sucumbir ante los desafíos emergentes.

La necesidad de analizar las capacidades de respuesta del sector se fundamenta en evidencias recientes. Rapalo et al. (2020) encontraron que, aunque un 41% de las MIPYMES en Tegucigalpa demuestran capacidad para desempeñarse ante eventualidades, un preocupante 59% carecen de preparación para manejar una crisis y ejecutar acciones de resiliencia. Los investigadores también señalan que solo el 21% presenta producción de calidad y un 42% muestra niveles de adaptabilidad a las variaciones del entorno. No obstante, resulta significativo que el 81% de estas organizaciones reconoce la eficacia como factor determinante para su éxito.

Desde una perspectiva teórica, este estudio se enmarca en conceptos clave que explican la supervivencia empresarial en la adversidad. La teoría de la capacidad dinámica postula que la resiliencia organizacional está vinculada a la habilidad para integrar, construir y reconfigurar competencias internas mientras se mantiene la flexibilidad en entornos cambiantes (Teece et al., 1997). Complementariamente, la teoría de la reserva de recursos propone que tanto la supervivencia como la recuperación dependen de una gestión estratégica eficaz de los recursos financieros y estratégicos (Barney, 1991). Adicionalmente, el enfoque de la teoría de liderazgo transformacional sostiene que la resiliencia se fundamenta en la capacidad del líder para motivar e inspirar a la organización en la superación de desafíos (Bass, 1985).

La justificación principal de este estudio radica en generar conocimiento para apoyar a las PYMES en su fortalecimiento, adaptación y recuperación ante futuras crisis, contribuyendo así a la formulación de políticas públicas y estrategias financieras que impulsen la sostenibilidad y el crecimiento económico del país (Consejo Hondureño de la Empresa Privada, 2020). La importancia del estudio se sustenta en el rol fundamental que desempeñan las PYMES como pilar de la economía hondureña. Aunque el sistema financiero reconoce a las pequeñas y medianas empresas como un sector clave para fomentar una economía resiliente, “persiste una limitada confianza en sus capacidades para gestionar la resiliencia y el riesgo climático, mientras el sector bancario percibe las demandas regulatorias como excesivas, incluso considerando la existencia de programas gubernamentales como Agrocrédito” (International Finance Corporation [IFC], 2022, p. 38).

Por lo anteriormente expuesto, el objetivo del estudio es analizar las estrategias de resiliencia que las PYMES en Tegucigalpa implementan para adaptarse a entornos cambiantes y desafiantes, fortaleciendo así su capacidad de adaptación y recuperación ante futuras crisis. Para esto, se plantean las siguientes hipótesis:

H1: Las PYMES en Tegucigalpa que implementan estrategias de resiliencia durante la pandemia de COVID-19 presentan mayores niveles de sostenibilidad, continuidad operativa y adaptabilidad que aquellas que no adoptan dichas estrategias.

H0: Las PYMES en Tegucigalpa que implementan estrategias de resiliencia durante la pandemia de COVID-19 no presentan mayores niveles de sostenibilidad, continuidad operativa y adaptabilidad que aquellas que no adoptan dichas estrategias.

Método

Tipo de estudio

Esta investigación adoptó un enfoque cuantitativo, con alcance descriptivo-correlacional permitiendo examinar la relación entre las estrategias de resiliencia y el sector empresarial durante la pandemia COVID-19. El diseño se clasificó como no experimental – transversal – correlacional. No experimental, porque se estudiaron las variables en su contexto natural sin manipulación; transversal, porque la recolección de datos se realizó en un momento único; y correlacional, porque permitió analizar las relaciones entre las dimensiones de resiliencia y las características de sector PYMES en Tegucigalpa (Hernández y Mendoza, 2018).

Participantes

La población estuvo conformada por pequeñas y medianas empresas (PYMES) ubicadas en la ciudad de Tegucigalpa. De acuerdo con datos reportados por Forbes y citados por GIA Consultores (2021), este tipo de empresas representa aproximadamente el 97.18% del sector empresarial hondureño (Instituto Nacional de Estadística de Honduras, 2023).

El tamaño de la muestra se estimó mediante la fórmula para poblaciones infinitas, considerando un nivel de confianza del 95% y un error muestral del 5%. A partir de un marco muestral de 21,462 empresas, se determinó un tamaño de muestra teórico de $n = 378$. No obstante, debido a limitaciones en el acceso y disponibilidad de las unidades de análisis durante el período de recolección de datos, se logró encuestar a un total de 262 empresas.

Esta reducción del tamaño muestral constituye una limitación del estudio y puede afectar el nivel de precisión de las estimaciones, por lo que los resultados deben interpretarse con cautela. La muestra final quedó distribuida en 134 pequeñas empresas (51.15%) y 128 medianas empresas (48.85%). Los criterios de inclusión consideraron todas las PYMES ubicadas en la ciudad de Tegucigalpa. Como criterios de exclusión se estableció la no participación de empresas localizadas en Comayagüela y otros municipios del país.

Instrumento

El instrumento aplicado fue la Encuesta sobre Resiliencia Empresarial en PYMES, la cual se fundamentó en un modelo teórico multicomponente que integra las cinco dimensiones identificadas en la literatura sobre resiliencia organizacional. Este modelo sigue los principios de la capacidad dinámica (Teece et al., 1997) y los enfoques basados en la capacidad de afrontamiento y adaptación (Duchek, 2020).

Las dimensiones de adaptabilidad, respuesta a crisis e innovación fueron respaldadas por los trabajos de Lengnick-Hall et al. (2005) y Rai et al. (2021). La inclusión de recursos financieros se sustentó en las investigaciones de Walikangs (2010), mientras que la resiliencia personal del líder se fundamentó en la teoría de liderazgo resiliente (Robb et al., 2022).

La encuesta evaluó cuatro datos demográficos y 16 ítems distribuidos en cinco secciones correspondientes a las variables dependientes: (a) Adaptabilidad y flexibilidad organizacional (AFO); (b) Capacidad de respuesta a crisis (CRC); (c) Innovación y aprendizaje organizacional (IAO); (d) Recursos financieros y estratégicos (RFE) y (e) Resiliencia personal del líder empresarial (RPLE). Las primeras cuatro dimensiones contaron con tres afirmaciones cada una, mientras RPLE incluyó cuatro afirmaciones; todos los ítems se midieron mediante una escala Likert con categorías de repuesta de 1 (Totalmente en desacuerdo) a 5 (Totalmente de Acuerdo).

Para establecer la validez de constructo se utilizó el programa SPSS versión 27, asegurando que las dimensiones cuantificaran el concepto teórico de resiliencia empresarial. La confiabilidad del instrumento se determinó mediante una prueba piloto aplicada a 20 empresas PYMES. La consistencia interna se evaluó utilizando el coeficiente del alfa de Cronbach (α), obteniendo los siguientes valores: AFO: α = 0.916, CRC: α = 0.784, IAO: α = 0.886, RFE: α = 0.854 y RPLE: α = 0.906.

Procedimiento y Análisis de Datos

Se aplicó un cuestionario a propietarios del sector PYMES en Tegucigalpa como fuente primaria directa sobre sus experiencias y estrategias durante la pandemia. Los instrumentos se administraron a través de Google Forms, asegurando la alineación con los objetivos del estudio y facilitando la recopilación sistemática de datos. Como parte del protocolo ético, se aplicó el consentimiento informado a cada participante, proporcionándoles información sobre el objetivo del estudio y enfatizando la naturaleza voluntaria de su participación, con garantía de confidencialidad para todas las respuestas. El equipo de investigadores realizó una revisión del protocolo y mantuvo una supervisión continua para garantizar la precisión y fiabilidad de los datos recolectados. La información se almacenó en los equipos informáticos del equipo investigador para preservar su integridad. Para el análisis estadístico se empleó el programa estadístico SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) versión 27, y se dividió en dos etapas:

- 1.Análisis descriptivo: Se calcularon frecuencias y distribuciones para describir el comportamiento de las variables, incluyendo datos demográficos y la percepción general de las cinco dimensiones de resiliencia (AFO, CRC, IAO, RFE, RPLE).
- 2.Análisis inferencial: Dado que los datos no presentaron distribución normal, se utilizó la prueba de correlación de Rho de Spearman para explorar las relaciones entre las variables de estudio, específicamente la asociación entre el sector PYMES y las cinco dimensiones de resiliencia analizadas.

Resultados

El análisis descriptivo de la muestra compuesta por 262 PYMES reveló que el 54.96% de los encuestados poseía nivel educativo superior, seguido del 30.92% con educación media y un 11.83% con educación primaria. En cuanto al sector económico, el comercio representó el 45.05%; mientras que los sectores de servicio e industria o manufactura constituyeron el 27.48% cada uno. Respecto a la antigüedad, el 30.53% de las empresas tenía entre 3 y 5 años de funcionamiento, seguido por un 23.66% con 6 a 8 años de operación. Al analizar la Sección 1: Adaptabilidad y Flexibilidad organizacional, las Pymes manifestaron en un 64.89% estar de acuerdo en su capacidad para enfrentar entornos cambiantes, Adicionalmente, un 66.80% indicó contar con una estructura organizativa que facilita la toma de decisión y el 58.78% reportó disponer de planes de contingencia ante situaciones imprevistas. Sin embargo, como se observa en la Tabla 1, se identificó un nivel bajo de capacidad para anticiparse a los cambios tanto en medianas empresas (35.11%) como en pequeñas empresas (32.44%).

Tabla 1.
Dimensión Adaptabilidad y Flexibilidad Organizacional (AFO)

Empresa	Nivel Bajo	Nivel Medio
Pequeña empresa	32.44%	18.70%
Mediana empresa	35.11%	13.74%

En relación con la Sección 2: Capacidad de Respuesta a Crisis, el 50.76% de los participantes afirmó tener protocolos establecidos para situaciones de crisis, aunque un significativo 33.59% se mostró indeciso ante esta afirmación. El 58.77% señaló implementar medidas efectivas para mantener la operatividad y el 56.49% expresó saber manejar situaciones de incertidumbre. La Tabla 2 ilustra una mayor vulnerabilidad en este aspecto, donde el 30.92% de las medianas empresas reportó un nivel bajo, mientras que el 29.77% de las pequeñas empresas se concentró en un nivel medio.

Tabla 2
Dimensión Capacidad de respuesta a crisis (CRC)

Empresa	Nivel Bajo	Nivel Medio
Pequeña empresa	21.37%	29.77%
Mediana empresa	30.92%	17.94%

Respecto a la Sección 3: Innovación y Aprendizaje Organizacional, el 62.59% de las PYMES indicó fomentar la innovación, el 62.21% reportó haber implementado nuevas estrategias desde el inicio de la pandemia, el 60.31% manifestó incentivar el aprendizaje y la mejora continua. A pesar de estos resultados positivos, los datos presentados en la Tabla 3 evidenciaron que el 33.59% de las medianas empresas y el 29.39% de las pequeñas empresas reportaron niveles bajos de experimentación y creatividad, sugiriendo que durante la crisis prevaleció la supervivencia sobre el cambio organizacional.

Tabla 3.
Dimensión Innovación y Aprendizaje Organizacional (IAO)

Empresa	Nivel Bajo	Nivel Medio
Pequeña empresa	29.39%	21.76%
Mediana empresa	33.59%	15.27%

En cuanto a la Sección 4: Recursos Financieros y Estratégicos, el análisis reveló que el 54.58% de las PYMES contaba con respaldo financiero, aunque existía un 25.57% de indecisión en este aspecto. El 50.38% reportó haber diversificado sus fuentes de ingreso, mientras que un preocupante 49.62% aún no lo había logrado. Adicionalmente, el 52.29% indicó tener acceso a financiamiento de emergencia. Como se aprecia en la Tabla 4, se identificó una limitación en capital operativo, con un 33.21% de las medianas empresas reportando un nivel bajo y un 32.44% de las pequeñas empresas ubicándose en un nivel medio, lo que restringe la capacidad de inversión en recursos estratégicos.

Tabla 4.
Dimensión Recursos Financieros y estratégicos (RFE)

Empresa	Nivel Bajo	Nivel Medio
Pequeña empresa	18.70%	32.44%
Mediana empresa	33.21%	15.65%

Finalmente, en la Sección 5: Resiliencia Personal del Líder Empresarial, los resultados mostraron que el 65.27% de los líderes mantiene la calma bajo presión, el 71.37% confiaba en su capacidad para superar dificultades, y el 75.95% consideraba los fracasos como oportunidades de aprendizaje. Sin embargo, tal como se observa en la Tabla 5, a nivel individual, el 26.72% de las pequeñas empresas y el 26.34% de las medianas empresas se concentran en el nivel medio, señalando un área potencial de mejora en adaptabilidad y toma de decisiones.

Tabla 5
Dimensión Resiliencia personal del líder empresarial (RPLE)

Empresa	Nivel Bajo	Nivel Medio
Pequeña empresa	20.61%	26.72%
Mediana empresa	21.37%	26.34%

Discusión

El análisis de las estrategias de resiliencia en las PYMES de Tegucigalpa revela una realidad compleja que confirma parcialmente los resultados esperados. Los hallazgos se alinean con la teoría de la capacidad dinámica de Teece et al. (1997), la cual sugiere que la resiliencia depende de la capacidad de la empresa para integrarse y reconfigurar competencias internas y externas. Destaca la resiliencia personal de los líderes empresariales y la tendencia a fomentar la innovación y el aprendizaje organizacional lo que confirma que las PYMES están activando su capacidad para adaptarse (Bass, 1985; Robb et al., 2022). De hecho, los líderes demuestran un alto nivel de confianza y calma para motivar al equipo y sostener la operatividad en la incertidumbre.

Sin embargo, la capacidad de respuesta se ve limitada por factores estructurales, algo que concuerda con la teoría de la reserva de recursos (Barney, 1991), la cual sugiere que la supervivencia depende de la gestión estratégica de recursos financieros, los cuales muestran una vulnerabilidad crítica en el estudio. En contraste con el estudio de Rapalo et al. (2020), quienes encontraron que el 41% de las PYMES tienen capacidad para responder ante eventualidades, los resultados de la presente investigación indican una baja diversificación de ingresos, con un 49.62% que no lo ha logrado. Esta proporción de empresas con nivel bajo en recursos financieros y estratégicos indica una vulnerabilidad sistemática que limita la acción estratégica, coincidiendo con lo señalado por la IFC (2022) sobre la poca confianza del sector bancario en las capacidades de las PYMES respecto a la resiliencia.

Los resultados sobre la correlación entre sectores empresariales y dimensiones de resiliencia deben interpretarse cuidadosamente en relación con las hipótesis planteadas. A pesar de que la implementación de estrategias aumenta la resiliencia, el sector PYMES mantiene una vulnerabilidad intrínseca en su respuesta a crisis y en respaldo financiero, debido a debilidades financieras estructurales que persisten en el sector. Este hallazgo coincide con Miranda (2020), quien destaca la importancia del entorno empresarial hondureño para desarrollar tolerancia y competencias necesarias para la supervivencia.

Las correlaciones bajas en adaptabilidad y flexibilidad, innovación y aprendizaje, y resiliencia personal del líder sugieren que no hay suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula (H_0). La hipótesis alterna solo se valida de forma parcial en el sentido de que las empresas muestran altos niveles de resiliencia actitudinal e innovadora. Estos resultados difieren parcialmente de los encontrados por Duchek (2020), quien establece una

relación más fuerte entre la capacidad de afrontamiento y adaptación con la resiliencia organizacional.

Las implicaciones prácticas de esta investigación son relevantes para el diseño de intervenciones que fortalezcan el sector empresarial. Se requieren programas financieros específicos que atiendan las debilidades en recursos financieros y estratégicos identificadas, así como formación en gestión de crisis que potencien la capacidad de respuesta. Los hallazgos pueden orientar políticas públicas que prioricen el fortalecimiento de las áreas más vulnerables del sector PYMES en Tegucigalpa.

Entre las limitaciones del estudio se encuentran el tamaño de la muestra que, aunque representativa, podría ampliarse para obtener resultados más generalizables. Además, el diseño transversal no permite evaluar la evolución de las estrategias de resiliencia a lo largo del tiempo. Para investigaciones futuras, sería valioso realizar estudios longitudinales que permitan analizar cómo evolucionan las estrategias de resiliencia en diferentes

etapas de crisis y recuperación, así como explorar con mayor profundidad los factores contextuales que influyen en la capacidad de adaptación de las PYMES hondureñas.

En conclusión, el análisis de las estrategias de resiliencia implementadas por las PYMES en Tegucigalpa permite concluir que: (a) la resiliencia personal del líder empresarial es la dimensión más fuerte, lo que confirma que el capital humano y el liderazgo transformacional son pilares para la supervivencia del sector en Tegucigalpa; (b) la limitación en recursos financieros y estratégicos representa la principal barrera para la resiliencia a largo plazo, ya que compromete la capacidad de inversión y la capacidad de absorber choques económicos y (c) las PYMES que logran desarrollar mecanismos de adaptación e innovación presentan mayor potencial de sostenibilidad, aunque persisten vulnerabilidades estructurales que requieren atención sistemática.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflictos de interés financieros ni personales que influyan en la investigación para la obtención, interpretación o publicación de estos resultados.

Financiamiento

Este estudio no recibió financiamiento de ninguna fuente gubernamental, empresarial, ni de organizaciones sin fines de lucro.

Referencias

- Barney, J. (1991). Firm Resources and sustained - Competitive Advantage. *Journal of Management*, 17(1), 99-120.
[https://josephmahoney.web.illinois.edu/BA545_Fall%202022/Barney%20\(1991\).pdf](https://josephmahoney.web.illinois.edu/BA545_Fall%202022/Barney%20(1991).pdf)
- Bass, B. M. (1985). *Leadership and performance beyond expectations*. The Free Press.
- Consejo Hondureño de la Empresa Privada. (2020). *Análisis de Resiliencia Empresarial*.
<https://www.cohep.org/analisis-resiliencia-empresarial/>
- Duchek, S. (2020). Organizational resilience: A capability-based conceptualization. *Business Research*, 13(1), 215-246.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s40685-019-0085-7>
- GIA Consultores. (2021). *Forbes Centroamerica. La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)*.
<https://forbescentroamerica.com/search?s=PYMES+HONDURAS+2023>
- Gulati, R. (1998). Alliances and networks. *Strategic Management Journal*, 19(4), 293-317.
<https://sms.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/%28SICI%291097-0266%28199804%2919%3A4%3C293%3A%3AAID-SMJ982%3E3.0.CO%3B2-M>
- Hernandez, S. R., & Mendoza, T. P. (2018). *Metodología de investigación, rutas cuantitativas, cualitativas y mixtas*. McGraw Hill.
- International Finance Corporation (2022). *Diagnóstico del sector privado, Creando Mercados en Honduras - Fomentar el desarrollo del sector privado para una economía resiliente e inclusiva*. <https://www.ifc.org/content/dam/ifc/doc/mgrt/cpsd-honduras-es.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística de Honduras. (11 de abril de 2023). *Directorio de Establecimientos económicos -base de datos- tipo empresa*. <http://181.115.7.199/binhnd/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=DEE&lang=ESP>
- Lengnick, H. C., Beck, T. E., & Lengnick, H. M. (2005). Adaptive strategies and resilience in organizations: The role of organization-wide capacity. *Southern Management Association*, 31(5) 211-228. <https://doi.org/10.1177/0149206305279367>
- Luthar, S., & Cushing, G. (diciembre de 1999). The construct of resilience: Implications for interventions and social policy". *Development and Psychopathology*, 26(2), 353-372. <https://doi.org/10.1017/s0954579400004156>
- Miranda, J. E. (17 de noviembre de 2020). El ecosistema de una empresa resiliente: El caso de la pequeña y mediana empresa en el occidente de Honduras. *Revista economía y administración*, 11(2), <https://doi.org/10.5377/EYA.VII12.10519>
- Rai, S. S., Rai, S., & Singh, N. K. (2021). Organizational resilience and social-economic sustainability: COVID-19 perspective. *Environment, Development and Sustainability* (23), 12006-12023 <https://doi.org/10.1007/s10668-020-01154-6>
- Rapalo, G. E., Ruiz, R. J., & Lagos, L. M. (2020). *Resiliencia Organizacional en el contexto de las MIPYMES Tegucigalpa* [Tesis, Centro Universitario Tecnológico (CEUTEC)]. <https://repositorio.unitec.edu/server/api/core/bitstreams/02d85063-9cae-4b7d-ae24-e8d23770d6fb/content>
- Robb, C. A., Kang, M., & Stephens, A. R. (2022). The effects of dynamism, relational capital, and ambidextrous innovation on the supply chain resilience of U.S. firms amid COVID-19. *Operations and Supply Chain Management*, 15(1), 1-16.
<https://doi.org/10.31387/oscm0480326>
- Schumpeter, J. A. (2003). *Capitalism, Socialism & democracy* (Obra original publicada en 1943 por Richard Swedberg). British Library Cataloguing-in-Publication Data.
<https://periferiaactiva.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/08/joseph-schumpeter-capitalism-socialism-and-democracy-2006.pdf>
- Solorzano, T. (2025). *Estilo de Liderazgo Directivo, Calidad y Gestión Administrativa en Pequeñas y Medianas Empresas de Tegucigalpa*. *Revista Regina Pacis*, 1(1), 12-19. <https://doi.org/10.63975/sp.11>
- Spence, M. (agosto de 1973). Job Market Signaling. *The Quarterly Journal of Economics*, 87(3), 355-37. <https://doi.org/10.2307/1882010>
- Teece, D. J., Pisano, G., & Shuen, A. (1997). Dynamic Capabilities and Strategic Management. *Strategic Management Journal*, 8(7), 509-523. <https://www.jstor.org/stable/3088148>
- Walikangs, L. (2010). *The Resilient Organization. How adaptive Cultures Thrive Even When Strategy Fails*. Mc-Graw Hill Professional.

Artículo Original

Hacia un marco contextualizado para la integración de inteligencia artificial en la educación superior hondureña: lecciones de la literatura internacional

Toward a contextualized framework for the integration of artificial intelligence in Honduran higher education: Lessons from international literature

Carlo Marcello Menjivar Montes de Oca¹ 

Resumen

Objetivo: Este artículo propone un marco conceptual preliminar para orientar la integración de inteligencia artificial generativa en la educación superior hondureña, fundamentado en una revisión narrativa de literatura internacional publicada entre 2020 y 2025. **Método:** La búsqueda se realizó de manera iterativa en bases académicas y repositorios institucionales, complementada con rastreo de referencias. Se analizaron veintitrés fuentes que documentan adopción institucional, percepciones docentes, marcos pedagógicos y experiencias regionales, distinguiendo entre estudios revisados por pares, reportes de organismos especializados y documentos de política pública. **Hallazgos principales:** Los hallazgos sugieren que la resistencia docente se asocia más con la ausencia de marcos pedagógicos claros y alfabetización conceptual que con un rechazo tecnológico; que los modelos de capacitación que priorizan la comprensión de cómo funciona la herramienta antes que su uso instrumental reportan mayor adopción sostenida; y que América Latina mantiene una respuesta institucional fragmentada. **Conclusiones:** Para Honduras, las experiencias internacionales ofrecen orientaciones adaptables, pero su implementación efectiva requiere investigación empírica local que actualmente no existe. **Limitaciones:** Este trabajo no incluye datos primarios sobre el contexto hondureño y debe entenderse como un marco conceptual preliminar sujeto a validación.

Palabras claves: inteligencia artificial, educación superior, formación docente, políticas educativas, Honduras

Abstract

Objective: This article proposes a preliminary conceptual framework to guide the integration of generative artificial intelligence in Honduran higher education, grounded in a narrative review of international literature published between 2020 and 2025. **Method:** The search was conducted iteratively in academic databases and institutional repositories, complemented by reference tracking. Twenty-three sources documenting institutional adoption, faculty perceptions, pedagogical frameworks, and regional experiences were analyzed, distinguishing between peer-reviewed studies, reports from specialized organizations, and public policy documents. **Main findings:** Findings suggest that faculty resistance is associated more with the absence of clear pedagogical frameworks and conceptual literacy than with technological rejection; that training models prioritizing understanding of how the tool works before its instrumental use report greater sustained adoption; and that Latin America maintains a fragmented institutional response. **Conclusions:** For Honduras, international experiences offer adaptable guidance, but effective implementation requires local empirical research that currently does not exist. **Limitations:** This work does not include primary data on the Honduran context and should be understood as a preliminary conceptual framework subject to validation.

Keywords: artificial intelligence, higher education, faculty training, educational policies, Honduras

Introducción

En el otoño de 2010, el profesor Patrick Henry Winston impartió en el Instituto Tecnológico de Massachusetts una de las clases que, con el tiempo, se convirtió en referencia para la enseñanza de inteligencia artificial. Antes de introducir algoritmos complejos, Winston dedicaba los primeros minutos a mostrar cómo un programa apila bloques, identifica animales por sus características o empaqueta comestibles. La razón pedagógica era explícita: antes de hablar de árboles de objetivos o sistemas expertos, los estudiantes necesitaban ver la máquina en acción para reconocer que tras cada decisión hay patrones y reglas programadas. Esta secuencia –comprender la herramienta antes de utilizarla– recoge una intuición pedagógica con raíces más antiguas, la máquina automata: el autómata es un dispositivo cuya capacidad simulada de razonar no debe confundirse con razonamiento, sino entenderse en sus mecanismos. La distinción importa, porque define qué significa enseñar con una herramienta cuya operación interna no es transparente para quien la usa.

En 2025, la educación superior enfrenta una encrucijada análoga. Herramientas de inteligencia artificial generativa como ChatGPT, Claude y Gemini se volvieron ubicuas en menos de tres años, pero la mayoría de las instituciones carecen de marcos pedagógicos articulados para integrarlas. Los docentes navegan esta transición con escasa capacitación formal y sin modelos institucionales que los guíen. En Honduras y América Latina la situación se agudiza: mientras países con mayor inversión educativa desarrollan estrategias nacionales, la región mantiene una respuesta fragmentada y reactiva.

Este artículo no presenta investigación empírica sobre Honduras. Propone, en cambio, un marco conceptual fundamentado en experiencias internacionales, organizado en torno a tres preguntas: por qué persiste la resistencia docente a la integración de inteligencia artificial; qué modelos de capacitación han demostrado efectividad sostenida; y cómo pueden adaptarse estas estrategias al contexto hondureño. La metáfora de la máquina automata sirve como hilo conductor: la inteligencia artificial no es adversario al que resistir ni panacea que adoptar acríticamente, sino herramienta compleja cuyo uso ético y efectivo depende de comprender primero cómo funciona.

La justificación es práctica. La velocidad de adopción de inteligencia artificial generativa demanda respuestas institucionales fundamentadas, pero Honduras y Centroamérica carecen de investigación sistematizada sobre adopción en educación superior. Ante esta ausencia de datos locales, el análisis crítico de experiencias internacionales puede ofrecer un marco inicial para orientar experimentación institucional y futuras investigaciones empíricas en el contexto hondureño.

Metodología

Se realizó una revisión narrativa de literatura publicada entre 2020 y 2025, con énfasis en estudios posteriores a noviembre de 2022 –fecha del lanzamiento público de ChatGPT– por marcar un punto de inflexión en el debate sobre inteligencia artificial generativa en educación superior. La revisión narrativa, a diferencia de la revisión sistemática tipo PRISMA, no pretende exhaustividad estadística sino síntesis interpretativa de tendencias y debates, y resulta adecuada cuando el objetivo es construir un marco conceptual preliminar más que cuantificar evidencia.

La búsqueda se realizó de manera iterativa en Google Scholar, Scopus y repositorios de acceso abierto (UNESCO, OEI, EDUCAUSE, Ithaka S+R, ResearchGate), utilizando

combinaciones de los descriptores "inteligencia artificial", "educación superior", "ChatGPT", "IA generativa", "formación docente", "políticas institucionales", "América Latina" y "Honduras", junto con sus equivalentes en inglés. La búsqueda se complementó con rastreo de referencias (snowball) a partir de los estudios identificados como centrales, con el fin de incorporar fuentes citadas frecuentemente pero no recuperadas mediante búsqueda directa.

Los criterios de inclusión priorizaron: estudios empíricos sobre adopción de IA en educación superior; reportes institucionales de organismos especializados con metodología explícita; marcos pedagógicos y de competencias propuestos por organismos internacionales; análisis de políticas institucionales; y estudios con énfasis en América Latina y países en desarrollo. Se excluyeron textos puramente especulativos sin sustento empírico o metodológico, opiniones editoriales sin revisión, y publicaciones en repositorios sin proceso editorial verificable.

Tras la depuración, se analizaron veintitrés fuentes, distinguiendo entre tres categorías: estudios revisados por pares en revistas indexadas (nueve fuentes), reportes de organismos institucionales acreditados con metodología pública (once fuentes), y documentos de política pública o marcos institucionales (tres fuentes). Esta diferenciación se mantiene a lo largo del análisis para evitar tratar como equivalentes evidencia empírica revisada por pares y diagnósticos institucionales, aunque ambos resulten relevantes para la discusión.

Se reconocen como limitaciones de esta revisión: el sesgo de la literatura disponible hacia contextos anglófonos y países desarrollados; la ausencia de investigación empírica revisada por pares sobre adopción de inteligencia artificial en universidades hondureñas; y el carácter reciente del fenómeno, que dificulta evaluar la sostenibilidad de las iniciativas documentadas. Las propuestas que se derivan deben entenderse como hipótesis a validar, no como prescripciones.

Desarrollo y discusión de la literatura

Estado de la adopción de inteligencia artificial en la educación superior global

La irrupción de ChatGPT en noviembre de 2022 marcó un punto de inflexión en la educación superior global. Las encuestas disponibles documentan una adopción acelerada pero desigual, caracterizada por experimentación institucional, incertidumbre docente y desarrollo incipiente de marcos regulatorios.

El Global AI Faculty Survey del Digital Education Council, basado en 1,681 respuestas de docentes de 52 instituciones en 28 países, reporta que el 86% de los docentes encuestados anticipa utilizar inteligencia artificial en su práctica futura, aunque solo el 6% considera que su institución ha proporcionado recursos suficientes para desarrollar alfabetización en IA (Digital Education Council, 2025). Por tratarse de un reporte institucional con muestra no probabilística autorrespondida, sus hallazgos describen tendencias antes que estimaciones poblacionales. La encuesta paralela de Freeman (2025) para el Higher Education Policy Institute, con 1,041 estudiantes de pregrado en universidades del Reino Unido, documenta que el 92% utiliza inteligencia artificial en alguna forma –un aumento desde 66% en el año previo– y el 88% la ha empleado en evaluaciones formales. La asimetría entre adopción estudiantil y preparación institucional aparece consistentemente en los reportes consultados.

El estudio cualitativo de Baytas y Ruediger (2025) para Ithaka S+R, basado en entrevistas con docentes e investigadores en

diecinueve universidades de Estados Unidos y Canadá, matiza estas cifras al identificar un patrón de "uso superficial": docentes que experimentan con la herramienta sin marco pedagógico explícito, estudiantes que la utilizan sin alfabetización crítica, y administradores sin métricas de impacto educativo. La presencia de inteligencia artificial en las aulas no equivale a transformación pedagógica.

El análisis revisado por pares de Jin et al. (2025), que examina políticas institucionales de cuarenta universidades en seis regiones globales aplicando la teoría de difusión de innovaciones, revela divergencias regionales significativas. Las instituciones asiáticas tienden a articular políticas de integración estructurada respaldadas por inversión estatal coordinada; las europeas priorizan regulación ética y protección de datos; las estadounidenses muestran el patrón más heterogéneo entre instituciones; y América Latina mantiene una posición predominantemente reactiva, sin estrategias regionales coordinadas. El estudio EDUCAUSE de Robert (2024), con respuestas de más de novecientos profesionales de tecnología educativa, identifica brechas en políticas institucionales como uno de los obstáculos principales para la integración efectiva.

Resistencias y barreras docentes frente a la inteligencia artificial

Contrario a narrativas simplificadoras, la investigación reciente sugiere que las barreras a la adopción son predominantemente estructurales, institucionales y epistemológicas antes que actitudinales. La resistencia es frecuentemente una respuesta razonable a condiciones inadecuadas.

El estudio empírico de Nevárez Montes y Elizondo-García (2025), con 208 docentes de una universidad privada mexicana, identifica como predictores principales de aceptación la facilidad de uso percibida, la utilidad para tareas específicas y el apoyo institucional, más que el conocimiento técnico previo. Este hallazgo, derivado de un contexto latinoamericano, sugiere que la resistencia opera menos como rechazo y más como espera de condiciones que hagan racional la inversión de tiempo. La revisión de Buele y Llerena-Aguirre (2025), realizada por investigadores ecuatorianos, identifica cinco grupos de obstáculos: limitada alfabetización en inteligencia artificial entre el profesorado, falta de claridad sobre lo que constituye uso pedagógico apropiado, debates éticos sobre transparencia algorítmica y privacidad, ausencia de marcos institucionales explícitos, y temor a la sustitución profesional.

El estudio de Shata (2025), publicado en *Frontiers in Communication* con 294 docentes de dos universidades públicas estadounidenses, examina específicamente a quienes deciden no utilizar inteligencia artificial generativa. Más de un tercio de los encuestados se identificó como "no usuario activo" y reportó cinco razones organizadas según la teoría de resistencia a la innovación: no estar preparado o no considerar el momento adecuado, no percibir valor agregado, sentir tensión con la identidad profesional, percibir amenazas a la inteligencia humana, y anticipar riesgos futuros que superan los beneficios presentes. La resistencia, en este marco, no es ignorancia sino evaluación crítica.

El meta-análisis de McGehee (2024) para Michigan Virtual, que sintetiza más de sesenta estudios sobre aceptación tecnológica de inteligencia artificial entre docentes, encuentra que la capacitación técnica es condición necesaria pero insuficiente. Los docentes que reciben entrenamiento puramente instrumental, sin marco pedagógico o ético, muestran tasas de adopción sostenida significativamente menores que aquellos que reciben capacitación integral. La pregunta operativa no es

"¿cómo funciona la herramienta?" sino "¿cómo puede fortalecer objetivos de aprendizaje específicos, y bajo qué condiciones?"

La revisión sistemática revisada por pares de Celik et al. (2022) sobre inteligencia artificial y docentes anticipa este hallazgo: los marcos teóricos de aceptación tecnológica predicen pobremente la adopción sostenida cuando la capacitación ignora dimensiones pedagógicas y éticas. El estudio reciente de Burgos (2026), publicado en la *Revista Iberoamericana de Educación a Distancia*, aporta evidencia regional relevante. Su investigación, basada en diecisiete talleres con 674 docentes universitarios distribuidos en cuatro continentes —e incluyendo participantes de Honduras y Costa Rica— encuentra que la preocupación ética es prácticamente unánime independientemente de cultura, grupo demográfico o categoría profesional. Este hallazgo es significativo porque sugiere que el debate sobre inteligencia artificial en educación superior comparte un núcleo ético transversal sobre el cual pueden construirse marcos de capacitación adaptables.

Capacitación y desarrollo profesional docente

El principio de "enseñar la herramienta primero" emerge transversalmente en la literatura sobre capacitación docente efectiva. Los recursos institucionales del MIT Sloan Teaching and Learning Technologies (2023a, 2023b) operacionalizan este principio en sus guías para docentes: antes de presentar aplicaciones pedagógicas específicas, las guías introducen qué es un modelo de lenguaje, cómo se entrena, qué sesgos incorpora, cuándo falla predeciblemente y por qué produce "alucinaciones". Solo después de establecer esta alfabetización conceptual se introducen estrategias didácticas. El enfoque invierte el modelo convencional de capacitación tecnológica, que típicamente enfatiza "cómo usar" antes que "cómo funciona".

El AI Competency Framework for Teachers de la UNESCO (Miao y Kukurova, 2024) ofrece una operacionalización más amplia. El marco identifica cinco aspectos de competencia —mentalidad centrada en el ser humano, ética de la inteligencia artificial, fundamentos y aplicaciones, pedagogía de la inteligencia artificial, y uso de la inteligencia artificial para el desarrollo profesional docente— articulados en tres niveles de progresión (adquirir, profundizar, crear), generando quince bloques de competencia. Es relevante destacar que el marco sitúa la competencia técnica como la dimensión menos crítica: docentes sin conocimiento profundo de arquitecturas neuronales pueden integrar inteligencia artificial efectivamente si poseen marcos pedagógicos y éticos sólidos.

El marco basado en capacidades de Burneo-Arteaga et al. (2025), publicado en *Frontiers in Education* por investigadores de Ecuador, Portugal y Estados Unidos, propone una progresión similar adaptable a contextos institucionales diversos: identificar tareas apropiadas para inteligencia artificial, diseñar instrucciones pedagógicamente efectivas, evaluar críticamente los resultados generados, integrar la herramienta en flujos pedagógicos, y reflexionar éticamente sobre las implicaciones. El marco rechaza explícitamente la idea de "dominio completo" como objetivo y propone en cambio "suficiencia funcional contextualizada".

A nivel de política, las propuestas de TeachAI (2024) —iniciativa que reúne al Foro Económico Mundial, Code.org, ETS, ISTE y Khan Academy con más de cien organizaciones asesoras— articulan cinco ideas fundacionales: fomentar liderazgo institucional con grupos de trabajo que incluyan a docentes, promover alfabetización en inteligencia artificial, proveer guía explícita sobre uso apropiado, construir capacidad mediante desarrollo profesional sostenido, y apoyar la innovación pedagógica. El reporte paralelo del World Economic Forum

(2024) sobre el rol de la inteligencia artificial en la educación 4.0 enfatiza que la inversión en capital humano docente debe preceder a la inversión en infraestructura tecnológica; instituciones que invierten significativamente en licencias y hardware mientras subinvierten en desarrollo profesional observan tecnología subutilizada.

Inteligencia artificial en América Latina: contexto regional

América Latina presenta una asimetría estructural respecto a las regiones que dominan la literatura sobre inteligencia artificial en educación superior. El reporte regional de Rivas (2025) para la Organización de Estados Iberoamericanos y la Fundación ProFuturo caracteriza el panorama como "en construcción": las iniciativas son fragmentadas, dirigidas por instituciones individuales, sin políticas nacionales articuladas, y con escasa coordinación regional. Este diagnóstico contrasta con la integración estructurada documentada por Jin et al. (2025) en instituciones asiáticas con respaldo estatal.

El estudio empírico de Fernández-Miranda et al. (2024), revisado por pares y publicado en *Computación y Sistemas*, identifica obstáculos específicos en universidades latinoamericanas: financiamiento insuficiente para infraestructura tecnológica y capacitación docente, burocracias institucionales que dificultan la adopción ágil de innovaciones, y resistencia al cambio en estructuras académicas tradicionales. Estos obstáculos preexisten al debate sobre inteligencia artificial y determinarán la capacidad de las instituciones para responder al fenómeno.

El working paper de Valentini y Blancas (2025) para UNESCO IESALC, basado en una revisión sistemática y un mapeo de iniciativas en dieciséis instituciones de educación superior en cinco regiones, argumenta la necesidad urgente de marcos de competencias adaptados al contexto regional. El análisis identifica una brecha entre la velocidad de adopción y la lentitud de las respuestas institucionales estructuradas, particularmente en contextos con recursos limitados. El documento de Mendigutxia (2024) para UNESCO IESALC sobre el rol de la educación superior en las estrategias nacionales de inteligencia artificial documenta que el 95% de los países analizados integra la educación superior en estrategias de formación de talento en IA, el 91% en investigación y desarrollo, pero solo el 48% en contribución a marcos éticos y regulatorios.

El reporte de Herrera et al. (2025) para la Comisión Económica para América Latina y el Caribe incluye la brecha digital entre las brechas estructurales de los modelos de desarrollo regional. A pesar de mejoras en conectividad y equipamiento, persisten brechas significativas en uso y, especialmente, en competencias digitales. El diagnóstico enfatiza que cerrar estas brechas requiere inversión sostenida en formación desde edades tempranas, lo que sugiere que la integración de inteligencia artificial en educación superior latinoamericana enfrenta un piso de competencias digitales que no puede asumirse como dado.

América Latina cuenta también con activos potenciales que la literatura tiende a subestimar: tradición de innovación pedagógica con orientación hacia equidad, capacidad de adaptación creativa con recursos limitados, y comunidades académicas colaborativas. Si estas fortalezas se movilizan intencionalmente, la región podría desarrollar modelos que prioricen justicia educativa, ofreciendo alternativas a enfoques tecnológicamente deterministas.

Honduras: condiciones estructurales y oportunidades

Honduras enfrenta condiciones estructurales particulares que enmarcan cualquier discusión sobre integración de inteligencia

artificial en educación superior. El Digital Ecosystem Country Assessment realizado por USAID (2022) entre marzo y noviembre de ese año documentó, mediante setenta y seis entrevistas con actores de sociedad civil, academia, sector privado y público, que el país arrastra rezagos en conectividad, accesibilidad y uso de tecnologías digitales respecto a sus vecinos en América Latina y el Caribe. El reporte identifica nueve áreas de recomendación que abarcan desde infraestructura hasta gobernanza digital, y señala explícitamente que la alfabetización digital no está integrada en los currículos nacionales de educación primaria y secundaria. Esta condición de base es relevante porque la integración efectiva de inteligencia artificial en educación superior presupone competencias digitales que actualmente no pueden darse por sentadas en la trayectoria educativa hondureña.

A nivel de política pública, la Política Nacional de la República Digital 2022-2025, formulada por la Presidencia de la República (2022), establece una visión de transformación digital con cinco ejes: gestión eficiente y transparente, conectividad para todos, habilidades e inclusión digital, innovación y desarrollo tecnológico, y transformación digital sectorial. El Plan Nacional de Gobierno Digital 2023-2026 complementa este marco con énfasis en modernización institucional. Sin embargo, ninguno de estos instrumentos aborda específicamente la integración de inteligencia artificial en educación superior, lo que constituye un vacío regulatorio que las universidades hondureñas tendrán que navegar sin guía nacional explícita.

A nivel de iniciativas, el programa Tinkering with Tech del UNICEF Global Learning Innovation Hub (2024), del cual Honduras es uno de los cuatro países piloto junto con Maldivas, Montenegro y Vietnam, ofrece un ejemplo de inversión en alfabetización digital de base. El programa opera con dispositivos micro:bit en escuelas vulnerables del norte del país y forma a docentes en pensamiento computacional. Aunque el programa no se enfoca en educación superior ni en inteligencia artificial específicamente, ejemplifica una estrategia que prioriza condiciones de base —alfabetización digital, formación docente, pensamiento computacional— sobre las cuales una integración posterior de inteligencia artificial en niveles superiores podría sostenerse.

El estudio de Burgos (2026), discutido anteriormente, es —hasta donde la presente revisión pudo identificar— el único trabajo empírico revisado por pares que incluye datos directos de docentes universitarios hondureños sobre inteligencia artificial en educación. El hallazgo de que la preocupación ética es transversal a culturas y contextos es particularmente relevante para Honduras: sugiere que el punto de partida para cualquier iniciativa de capacitación docente local puede anclarse en preocupaciones que los propios docentes ya formulan, antes que en agendas técnicas externas.

Las condiciones estructurales descritas no implican que Honduras esté condenada a la exclusión. Las experiencias internacionales analizadas en este artículo sugieren orientaciones adaptables al contexto: modelos de capacitación docente que prioricen comprensión conceptual antes que destreza técnica (MIT Sloan Teaching and Learning Technologies, 2023a, 2023b; Miao y Cukurova, 2024); marcos basados en suficiencia funcional contextualizada antes que dominio completo (Burneo-Arteaga et al., 2025); construcción de comunidades de práctica antes que talleres puntuales; y diferenciación clara entre lo que la inteligencia artificial puede hacer y lo que la pedagogía debe seguir haciendo (Baytas y Ruediger, 2025). Estas orientaciones, sin embargo, requieren validación mediante experimentación piloto e investigación empírica local antes de adoptarse como recomendaciones de política.

Marcos pedagógicos para la integración

La integración efectiva de inteligencia artificial en educación superior requiere marcos pedagógicos que anclen su uso en objetivos educativos sustantivos. Sin estos marcos, las instituciones adoptan tecnología por novedad sin transformación educativa genuina, como documenta el estudio cualitativo de Baytas y Ruediger (2025).

Los marcos analizados convergen en algunos principios. Primero, transparencia respecto al uso: los docentes deben explicitar cuándo y cómo emplean inteligencia artificial en su práctica, modelando uso reflexivo en lugar de ocultar la herramienta (Miao y Cukurova, 2024). Segundo, evaluación de proceso antes que de producto: dado que la inteligencia artificial generativa puede producir resultados sofisticados, la evaluación pedagógica debe desplazarse hacia el proceso de aprendizaje observable (Burneo-Arteaga et al., 2025). Tercero, alfabetización crítica antes que destreza instrumental: comprender capacidades y limitaciones, incluyendo sesgos algorítmicos y limitaciones epistemológicas, antes que dominar interfaces (Celik et al., 2022).

No existe un marco universal aplicable. Los contextos disciplinarios importan: el uso apropiado en programación difiere del uso apropiado en escritura creativa. Los contextos institucionales importan: una universidad pública con recursos limitados enfrenta restricciones distintas a una universidad privada con infraestructura tecnológica robusta. Los contextos culturales importan: lo que se considera uso ético varía entre tradiciones académicas. Los marcos efectivos proporcionan principios orientadores adaptables, no recetas prescriptivas universales (Valentini y Blancas, 2025).

Conclusiones

Esta revisión narrativa de literatura internacional sugiere tres síntesis principales. Primero, la transformación de la educación superior por inteligencia artificial generativa ha sido acelerada pero desigual; la adopción tecnológica no equivale a transformación pedagógica, y la mayoría de las instituciones permanecen en fase reactiva sin marcos estratégicos articulados. Segundo, las barreras a la integración efectiva son predominantemente estructurales e institucionales antes que actitudinales: los docentes resisten por sobrecarga, ausencia de marcos pedagógicos, incertidumbre ética y falta de apoyo institucional. Los modelos que abordan estas barreras mediante capacitación práctica anclada en comprensión conceptual y políticas claras reportan tasas de adopción superiores. Tercero, América Latina mantiene una posición predominantemente reactiva; Honduras y la región centroamericana enfrentan condiciones estructurales más complejas, pero experiencias internacionales sugieren que países con recursos limitados pueden desarrollar estrategias efectivas si priorizan inversión en capital humano docente.

El principio pedagógico de la *machina automata* —comprender el autómata antes de utilizarlo— recoge una intuición que recorre transversalmente la literatura revisada. El modelo MIT de "enseñar la herramienta primero", el énfasis de UNESCO en alfabetización conceptual antes que técnica, el marco de capacidades de Burneo-Arteaga y colegas, y el hallazgo de Shata sobre las razones reales de la no adopción docente convergen en una misma orientación: la inteligencia artificial no es adversario al que resistir ni panacea que adoptar acríticamente, sino dispositivo cuyo uso reflexivo requiere primero comprender qué hace cuando parece razonar. Esta comprensión, más que la destreza instrumental, parece ser la condición de posibilidad para que la integración en educación superior sea pedagógicamente sustantiva.

Para Honduras, las experiencias internacionales analizadas sugieren orientaciones adaptables, pero no constituyen prescripciones. La literatura sugiere que las inversiones en capacitación conceptual docente, en políticas institucionales explícitas y participativas, en comunidades de práctica para experimentación colaborativa, y en investigación empírica local podrían constituir condiciones favorables para una integración efectiva. La coordinación regional centroamericana podría aportar economías de escala en recursos formativos compartidos. Cada una de estas orientaciones, sin embargo, requiere validación mediante experimentación piloto antes de adoptarse como política.

Limitaciones del estudio

Este trabajo se fundamenta exclusivamente en síntesis de literatura internacional. No incluye datos primarios sobre el estado actual de adopción de inteligencia artificial en universidades hondureñas, percepciones de docentes locales, análisis de iniciativas institucionales específicas en el país, ni validación empírica de las orientaciones discutidas. La literatura revisada presenta un sesgo hacia contextos anglófonos y países desarrollados; las fuentes latinoamericanas disponibles, aunque relevantes, son todavía escasas y heterogéneas en metodología. Las afirmaciones sobre efectividad de modelos se basan principalmente en reportes institucionales y estudios observacionales, y la mayoría carecen de evidencia experimental rigurosa con grupos de control. Este artículo debe entenderse, en consecuencia, como un marco conceptual preliminar sujeto a validación.

Recomendaciones para investigación futura

Se requiere investigación empírica local que aborde, entre otras preguntas: el estado actual de uso de inteligencia artificial por docentes y estudiantes universitarios en Honduras; estudios de caso de iniciativas de integración en instituciones hondureñas; evaluación experimental de la efectividad de distintos modelos de capacitación docente en contextos de recursos limitados; estudios longitudinales sobre el impacto de inteligencia artificial generativa en pensamiento crítico y aprendizaje profundo; análisis de implicaciones éticas y de equidad en el contexto hondureño; e investigación sobre gobernanza institucional y desarrollo de políticas contextualizadas. Esta agenda no puede resolverse mediante revisiones de literatura adicionales; requiere trabajo de campo, recursos para investigación y compromiso institucional sostenido.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflictos de intereses financieros o institucionales en la elaboración de este artículo. Durante la organización bibliográfica y estructuración de argumentos se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa como apoyo, conforme a la política de la revista; el autor revisó y validó todas las fuentes y asume completa responsabilidad por el contenido final del manuscrito.

Financiamiento

Este estudio no recibió financiamiento de fuentes gubernamentales, empresariales ni de organizaciones sin fines de lucro.

Referencias

- Baytas, C., y Ruediger, D. (2025). Making AI generative for higher education: Adoption and challenges among instructors and researchers. Ithaka S+R. <https://sr.ithaka.org/publications/making-ai-generative-for-higher-education/>
- Buele, J., y Llerena-Aguirre, L. (2025). Transformations in academic work and faculty perceptions of artificial intelligence in higher education. *Frontiers in Education*, 10, 1603763. <https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1603763>
- Burgos, D. (2026). ¿Cuáles son las preocupaciones reales de los profesores universitarios sobre la inteligencia artificial en educación? RIED-Revista Iberoamericana de Educación a Distancia, 29(2). <https://doi.org/10.5944/ried.47294>
- Burneo-Arteaga, P., Lira, Y., Murzi, H., Balula, A., y Costa, A. P. (2025). Capability-based training framework for generative AI in higher education. *Frontiers in Education*, 10, 1594199. <https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1594199>
- Cellik, I., Dindar, M., Muukkonen, H., y Järvelä, S. (2022). The promises and challenges of artificial intelligence for teachers: A systematic review of research. *TechTrends*, 66(4), 616-630. <https://doi.org/10.1007/s11528-022-00715-y>
- Digital Education Council. (2025). Digital Education Council global AI faculty survey 2025. Digital Education Council. <https://www.digitaleducationcouncil.com/post/digital-education-council-global-ai-faculty-survey>
- Fernández-Miranda, M., Román-Acosta, D., Jurado-Rosas, A. A., Limón-Domínguez, D., y Torres-Fernández, C. (2024). Artificial intelligence in Latin American universities: Emerging challenges. *Computación y Sistemas*, 28(2), 435-450. <https://doi.org/10.13053/cys-28-2-4822>
- Freeman, J. (2025). Student generative AI survey 2025 (HEPI Policy Note 61). Higher Education Policy Institute. <https://www.hepi.ac.uk/reports/student-generative-ai-survey-2025/>
- Herrera, P., Huepe, M., y Trucco, D. (2025). Educación y desarrollo de competencias digitales en América Latina y el Caribe (LC/TS.2025/3). Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://hdl.handle.net/11362/81377>
- Jin, Y., Yan, L., Echeverría, V., Gašević, D., y Martínez-Maldonado, R. (2025). Generative AI in higher education: A global perspective of institutional adoption policies and guidelines. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 8, 100348. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100348>
- McGehee, N. (2024). Breaking barriers: A meta-analysis of educator acceptance of AI technology in education. *Michigan Virtual*. <https://michiganvirtual.org/research/publications/breaking-barriers-a-meta-analysis-of-educator-acceptance-of-ai-technology-in-education/>
- Mendigutxia, A. (2024). Análisis PES - El papel de la educación superior en las estrategias nacionales de inteligencia artificial: una revisión comparativa de políticas. UNESCO International Institute for Higher Education in Latin America and the Caribbean. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000392038>
- Miao, F., y Kukurova, M. (2024). AI competency framework for teachers. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000391104>
- MIT Sloan Teaching and Learning Technologies. (2023a). Getting started with AI-enhanced teaching: A practical guide for instructors. Massachusetts Institute of Technology. <https://mitsloanedtech.mit.edu/ai/teach/getting-started/>
- MIT Sloan Teaching and Learning Technologies. (2023b). Practical strategies for teaching with AI. Massachusetts Institute of Technology. <https://mitsloanedtech.mit.edu/ai/teach/practical-strategies-for-teaching-with-ai/>
- Nevárez Montes, J., y Elizondo-García, J. (2025). Faculty acceptance and use of generative artificial intelligence in their practice. *Frontiers in Education*, 10, 1427450. <https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1427450>
- Presidencia de la República de Honduras. (2022). Política Nacional de la República Digital: Hacia la refundación de una Honduras digital (2022-2025). Dirección de Gestión por Resultados. <https://www.diger.gob.hn/node/136>
- Rivas, A. (2025). La llegada de la IA a la educación en América Latina: en construcción. Organización de Estados Iberoamericanos y Fundación ProFuturo. <https://oei.int>
- Robert, J. (2024). 2024 EDUCAUSE AI landscape study. EDUCAUSE. <https://library.educause.edu/resources/2024/2/2024-educause-ai-landscape-study>
- Shata, A. (2025). "Opting out of AI": Exploring perceptions, reasons, and concerns behind faculty resistance to generative AI. *Frontiers in Communication*, 10, 1614804. <https://doi.org/10.3389/fcomm.2025.1614804>
- TeachAI. (2024). Foundational policy ideas for AI in education. TeachAI. <https://www.teachai.org/policy>
- UNICEF Global Learning Innovation Hub. (2024). Tinkering with Tech. United Nations Children's Fund. <https://www.unicef.org/digitaleducation/tinkering-with-tech>
- USAID. (2022). Honduras digital ecosystem country assessment. United States Agency for International Development. <https://www.digitaldevelopment.org/countries/honduras/>
- Valentini, A., y Blancas, A. (2025). The challenges of AI in higher education and institutional responses: Is there room for competency frameworks? UNESCO IESALC. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000394935>
- Weizenbaum, J. (1966). ELIZA—A computer program for the study of natural language communication between man and machine. *Communications of the ACM*, 9(1), 36-45. <https://doi.org/10.1145/365153.365168>
- World Economic Forum. (2024). Shaping the future of learning: The role of AI in education 4.0. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/reports>

De moléculas a sociedades complejas: las restricciones de escala en la evolución a la complejidad

From Molecules to Complex Societies: Scale Constraints in the Evolution to Complexity

Edwin Francisco Herrera-Paz 

Resumen

Los sistemas biológicos y sociotecnológicos evolucionan de configuraciones simples a complejas. Este trabajo plantea que las transiciones evolutivas mayores en individualidad (TEMI) ocurren cuando los sistemas alcanzan restricciones de escala derivadas de relaciones alométricas y físicas, lo que limita la evolución de la complejidad dentro de un nivel organizacional. Mediante ejemplos que van desde moléculas hasta sociedades humanas, se analiza cómo variables relacionadas con el intercambio de materia y energía, el transporte interno y la coordinación funcional escalan de forma no lineal con el crecimiento del sistema, generando ventajas iniciales, pero también límites estructurales. La transición evolutiva de una simple población de elementos a un individuo de orden superior suele darse en tamaños intermedios, donde los sistemas comienzan a experimentar saturación funcional debido a restricciones alométricas. En lugar de detenerse el crecimiento, la complejidad se redistribuye a un nivel superior mediante integración, cooperación y división del trabajo, como ocurre en la transición de moléculas a células, de células a organismos multicelulares, de insectos a colonias eusociales, y de mamíferos a sociedades humanas complejas. Así, las restricciones de escala explican la aparición recurrente de nuevos niveles de organización en sistemas biológicos y sociotecnológicos.

Palabras claves: complejidad, evolución, escalamiento alométrico, sistemas complejos, transiciones evolutivas mayores, multicelularidad

Abstract

Biological and sociotechnological systems evolve from simple to complex configurations. This work suggests that major evolutionary transitions in individuality (METI) occur when systems reach scale constraints derived from allometric and physical relationships, which limit the evolution of complexity within an organizational level. Using examples ranging from molecules to human societies, it analyzes how variables related to the exchange of matter and energy, internal transport, and functional coordination scale in a nonlinear manner as the system grows, generating initial advantages but also structural limits. The evolutionary transition from a simple population of elements to a higher-order individual typically occurs at intermediate sizes, where systems begin to experience functional saturation due to allometric constraints. Instead of halting growth, complexity is redistributed to a higher level through integration, cooperation, and division of labor, as seen in the transition from molecules to cells, cells to multicellular organisms, insects to eusocial colonies, and mammals to complex human societies. Thus, scale constraints explain the recurring emergence of new levels of organization in biological and sociotechnological systems.

Keywords: allometric scaling, complex systems, evolution, major evolutionary transitions, multicellularity

Introducción

La evolución de los sistemas vivos muestra una tendencia recurrente hacia el aumento de complejidad organizacional a lo largo del tiempo. En trabajos previos hemos propuesto que este incremento no es aleatorio ni puramente contingente, sino que responde a la convergencia de un conjunto relativamente estable de factores que favorecen la emergencia, el mantenimiento y la expansión de estructuras cada vez más complejas. Entre estos factores se incluyen: el crecimiento en tamaño o escala del sistema; las ventajas competitivas y económicas relacionadas con tamaños mayores; el acceso y la eficiencia en el uso de la energía; la capacidad de procesar y almacenar información; la división del trabajo entre componentes especializados; el desarrollo de infraestructuras internas que permiten la comunicación; mejoras en el transporte de materia, de energía y de información, y en algunos casos, la especialización reproductiva (Carmel & Shavit, 2020; Herrera-Paz, 2015, 2022, 2025, 2026). Estos elementos aparecen reiteradamente en transiciones evolutivas que abarcan desde lo biológico hasta lo sociocultural y tecnológico, sugiriendo la existencia de principios generales subyacentes al aumento de complejidad.

Sin embargo, la presencia de estos factores, aunque necesaria, no es suficiente por sí misma para explicar la ocurrencia de transiciones evolutivas entre niveles de organización, llamadas “transiciones evolutivas mayores en individualidad” o TEMI (Maynard Smith & Szathmáry, 1995). Estos factores impulsan el crecimiento, la integración y la complejidad dentro de un mismo nivel organizacional, pero también conducen progresivamente al sistema hacia límites estructurales inherentes a dicho nivel. En este sentido, deben entenderse como motores del proceso de acumulación de complejidad, cuyo efecto combinado empuja al sistema hacia condiciones en las que la organización existente deja de ser sostenible.

En este trabajo se propone que la pieza faltante para comprender el salto entre niveles no reside en la aparición de nuevos factores, sino en la aproximación del sistema a dichos límites estructurales. En particular, la saturación progresiva de ciertas relaciones alométricas —derivadas de restricciones físicas y organizativas ampliamente documentadas en la literatura (West et al., 1997, 1999; Sánchez Garduño & Gutiérrez Sánchez, 2020)— actúa como condición crítica que desencadena la transición. A medida que la complejidad aumenta dentro de un nivel dado, el sistema entra en un régimen de tamaño intermedio en el cual algunas relaciones de escala comienzan a mostrar rendimientos decrecientes o comportamientos saturantes.

Estos límites emergen de relaciones no lineales entre el tamaño y variables fundamentales como el metabolismo, la capacidad de almacenamiento de información, el intercambio de materia y energía, el transporte interno y el soporte mecánico, las cuales siguen leyes de potencia bien caracterizadas en dominios biológicos, socioculturales y tecnológicos. En este régimen —previo al agotamiento completo del espacio alométrico viable— el conjunto de soluciones organizativas dentro del nivel se reduce progresivamente. Como consecuencia, aumenta la presión selectiva por reorganizaciones estructurales que permiten continuar la acumulación de complejidad funcional en un nivel superior, sin violar las restricciones impuestas por la escala (Herrera-Paz, 2022).

La alometría proporciona un marco teórico particularmente adecuado para abordar este problema. Las relaciones alométricas describen cómo distintas variables biológicas, ecológicas o sociotecnológicas escalan con el tamaño siguiendo

leyes de potencia, generalmente de la forma $Y=kX^p$. Estas leyes han demostrado una notable robustez empírica, aplicándose tanto a organismos individuales —por ejemplo, metabolismo, frecuencia cardíaca o longevidad— como a sistemas colectivos complejos, incluyendo colonias de insectos, ciudades y redes de transporte. La recurrencia de exponentes alométricos similares sugiere que muchas propiedades sistémicas no escalan linealmente con el tamaño, sino que están sujetas simultáneamente a ganancias de eficiencia, cuellos de botella y, eventualmente, a procesos de saturación (Savage et al., 2004; Brown et al., 2004; Allen, 2014).

Es importante destacar que las consideraciones alométricas no actúan exclusivamente como restricciones negativas. En muchos casos, el aumento de tamaño dentro de un nivel organizacional conlleva ventajas competitivas claras, como mejoras en la eficiencia energética, reducción de costos relativos de transporte o economías de escala en el procesamiento de información, tanto en organismos biológicos como en poblaciones humanas modernas (West et al., 2002; Bettencourt et al., 2020). Estas relaciones contribuyen activamente al aumento de complejidad dentro del nivel y explican por qué la selección favorece, hasta cierto punto, sistemas de mayor tamaño. No obstante, otras relaciones alométricas presentan un comportamiento fundamentalmente distinto: se saturan o se vuelven limitantes al crecimiento más allá de ciertos umbrales (Kempes et al., 2019), impidiendo que el sistema continúe expandiéndose bajo la misma organización. Es precisamente la interacción entre estos dos regímenes —uno que favorece el crecimiento y otro que lo limita— lo que genera una tensión estructural característica de los sistemas en transición.

Bajo estas condiciones, los factores previamente descritos (energía, información, crecimiento, especialización y comunicación) no solo impulsan la complejidad, sino que contribuyen indirectamente a acercar al sistema a su límite alométrico. Cuando este límite es alcanzado o aproximado, la reorganización hacia un nivel superior emerge como una solución evolutiva que permite continuar el crecimiento y la complejidad bajo una nueva arquitectura organizativa.

Desde esta perspectiva, las TEMI pueden entenderse como el resultado de la interacción entre motores de complejidad y restricciones de escala: los primeros impulsan el sistema, mientras que las segundas definen el punto crítico en el que el salto de nivel se vuelve necesario. En este proceso, a medida que el conjunto aumenta en complejidad, los elementos que lo constituyen tienden a simplificarse funcionalmente. Esto a su vez determina la irreversibilidad característica de las TEMI.

En Herrera-Paz (2026) se mostró que, en las transiciones a la multicelularidad y a sociedades humanas complejas, la saturación del contenido informacional a nivel del sistema impulsa su redistribución entre componentes, dando lugar a la división del trabajo como respuesta organizativa. Aquí se explora en general cómo la alometría, y en particular la aproximación del sistema a la saturación de determinadas relaciones de escala —sin necesidad de alcanzar los valores máximos teóricos de tamaño— puede entenderse como el mecanismo desencadenante de las transiciones evolutivas entre niveles de organización. Este enfoque mecanicista, basado en restricciones independientes del nivel, permite integrar la evolución hacia sistemas complejos en ámbitos biológicos, sociales y tecnológicos bajo un principio explicativo común. Asimismo, la proximidad a la saturación alométrica puede constituir un criterio teórico para identificar cuándo un sistema se aproxima a un umbral transicional. En las secciones siguientes, se examinan estas ideas a través de ejemplos empíricos. Estos incluyen las restricciones de tamaño

implicadas en la transición de moléculas biológicas a células, en la multicelularidad, en la aparición de superorganismos en algunas especies de insectos, y en la transición humana a sociedades complejas.

1. De moléculas a células: restricciones de escala en sistemas autorreplicantes

La evolución darwiniana no requiere, en principio, la existencia de células. Es suficiente con entidades capaces de autorreplicarse, almacenar información heredable y exhibir variación en su eficiencia replicativa. Algunos sistemas moleculares con actividad catalítica, como ribozimas u otros polímeros funcionales, cumplen estos requisitos mínimos (Gianni et al., 2026). Sin embargo, aunque permiten la emergencia de heredabilidad, variación y selección, presentan limitaciones estructurales severas cuando se considera la posibilidad de incrementar indefinidamente su complejidad mediante el aumento del tamaño molecular.

En el nivel molecular, el “tamaño” puede definirse operativamente como la longitud del polímero, su masa molecular o el número de grados de libertad conformational. El aumento de tamaño permite, hasta cierto punto, la incorporación de nuevas funciones catalíticas y una mayor capacidad de almacenamiento de información, como ilustran ARN catalíticos de cientos de nucleótidos, proteínas enzimáticas grandes y complejos macromoleculares especializados (Dobson, 2003). No obstante, la distribución empírica de tamaños moleculares funcionales muestra que la mayoría de estos sistemas se concentran en un rango acotado, muy por debajo de los tamaños máximos físicamente posibles, lo que sugiere la existencia de restricciones de escala bien definidas (Zhang, 2000).

En este contexto, los tamaños intermedios no corresponden a un valor absoluto, sino a un régimen funcional situado entre un tamaño mínimo insuficiente para sostener funciones complejas y un tamaño máximo impuesto por restricciones fisicoquímicas, cinéticas e informacionales. En este régimen, el aumento de tamaño aún proporciona beneficios funcionales, pero comienza a experimentar rendimientos decrecientes y costos crecientes asociados a estabilidad, plegamiento, replicación y difusión.

Uno de los límites más evidentes al crecimiento molecular es la estabilidad estructural. Moléculas grandes tienden a ser más frágiles y difíciles de sintetizar y mantener, especialmente en condiciones prebióticas (Dill & MacCallum, 2012). Las proteínas extremadamente largas, como la titina, ilustran este punto: su enorme tamaño solo es viable dentro de un entorno celular altamente controlado, con sistemas de plegamiento asistido, reparación y degradación. Fuera de ese contexto, estructuras moleculares de tal escala serían inestables y funcionalmente inviables, constituyendo excepciones dependientes de infraestructuras de nivel superior (Linke, 2008).

El plegamiento impone una restricción adicional. A medida que aumenta la longitud de un polímero, el número de conformaciones posibles crece exponencialmente, mientras que la probabilidad de adoptar espontáneamente una conformación funcional disminuye. Por ello, ribozimas y proteínas funcionales tienden a concentrarse en rangos de tamaño intermedios, mientras que las moléculas excesivamente largas sufren mal plegamiento, agregación o pérdida de especificidad catalítica (Dobson, 2003).

La difusión constituye otra limitación crítica. El coeficiente de difusión disminuye con el tamaño molecular, reduciendo la frecuencia de encuentros efectivos con sustratos u otras moléculas replicantes. En sistemas no compartimentalizados, esta pérdida de movilidad impone un costo cinético creciente que ralentiza la replicación y la catálisis, penalizando a moléculas

grandes frente a competidores más pequeños y móviles (Ellis, 2001).

Una restricción particularmente importante emerge a nivel informacional. Cuando la tasa de error por monómero es distinta de cero, la fidelidad de replicación disminuye exponencialmente con la longitud de la molécula, imponiendo un límite superior al tamaño de las secuencias que pueden mantenerse bajo selección darwiniana. En consecuencia, los sistemas autorreplicantes tienden a concentrarse en tamaños intermedios cercanos al máximo informacional viable, antes de que la acumulación de errores comprometa la herencia (Eigen et al., 1989).

Los virus ofrecen un ejemplo empírico ilustrativo tanto de estas restricciones como de sus excepciones. En la mayoría de los virus, el volumen del virión escala de manera no lineal con la longitud del genoma según la relación alométrica $V = kL^b$, con $b \approx 1.43$, de modo que incrementos modestos en información genética requieren aumentos desproporcionados en la estructura física que la contiene (Cui et al., 2014). Este escalamiento desfavorable impone límites prácticos al crecimiento del genoma viral. Los virus gigantes, como los mimivirus, constituyen excepciones notables, con genomas y viriones de tamaño comparable al de bacterias pequeñas (Abergel & Claverie, 2020). Sin embargo, estas excepciones dependen de condiciones altamente específicas y se sitúan cerca de los límites superiores del espacio molecular viable, sin dar lugar a una expansión indefinida de complejidad dentro del nivel molecular.

De manera similar, complejos macromoleculares como los ribosomas ilustran la existencia de umbrales funcionales en el tamaño de ensamblajes moleculares. Aunque altamente organizados, su tamaño y composición están finamente ajustados, y un aumento significativo de su escala sin compartimentalización y control celular resultaría inviable (Shajani et al., 2011; Noller, 2012). Estos complejos representan soluciones cercanas al límite superior funcional del nivel molecular, más que puntos de partida para una acumulación ilimitada de complejidad.

En conjunto, estas restricciones estructurales, cinéticas e informacionales conducen a una saturación progresiva del espacio evolutivo viable para sistemas autorreplicantes moleculares. Aunque es posible aumentar la complejidad hasta tamaños intermedios elevados, el crecimiento adicional se vuelve cada vez más costoso, frágil y dependiente de condiciones externas específicas.

La transición hacia un nuevo nivel organizacional ocurre cuando la complejidad se redistribuye mediante la emergencia de estructuras colectivas y compartimentalizadas. La aparición de membranas lipídicas y protocélulas permitió resolver simultáneamente varias de las restricciones descritas, al incrementar la estabilidad de los sistemas replicantes, mejorar la eficiencia de las interacciones moleculares, facilitar la separación funcional entre información y catálisis, y atenuar los efectos de los errores replicativos (Gómez-Márquez, 2025; Hadarovich et al., 2026). Así, la célula pudo haber emergido no como un requisito previo para la evolución, sino como una solución estructural a las limitaciones de escala inherentes a los sistemas moleculares autorreplicantes.

La evidencia geoquímica, paleontológica y experimental indica que los primeros sistemas evolutivos surgieron como redes moleculares autorreplicantes y catalíticas antes de la consolidación de la organización celular. Isótopos y microestructuras en rocas muy antiguas sugieren actividad biológica o prebiótica hace más de 4 mil millones de años, en una etapa temprana de la historia de la Tierra previa a la aparición de células plenamente desarrolladas.

La aparición de las primeras células se sitúa posteriormente, entre aproximadamente ~3.8 y ~3.5 mil millones de años atrás, coincidiendo con la estabilización de membranas, metabolismo integrado y mecanismos más robustos de herencia genética. Estudios filogenéticos recientes sobre el Último Ancestro Común Universal (LUCA) son consistentes con este escenario y apoyan una transición gradual desde sistemas moleculares no compartimentalizados hacia la organización celular (Westall, 2025; Dagan & Martin, 2023).

2. De células a organismos multicelulares: restricciones de escala en sistemas unicelulares

Una vez establecida la célula como unidad básica de la vida, la complejidad biológica pudo aumentar de manera significativa dentro de este nivel organizacional mediante la expansión metabólica, la diversificación funcional y el incremento del tamaño celular. Las células individuales son sistemas altamente integrados que combinan información genética, catálisis, regulación y compartimentalización, lo que les permite sostener una amplia gama de funciones adaptativas. Sin embargo, al igual que en el nivel molecular, la acumulación indefinida de complejidad mediante el simple aumento del tamaño celular se ve limitada por restricciones estructurales fundamentales.

En el nivel celular, el “tamaño” puede definirse operativamente como el volumen celular, la masa total de biomoléculas o la extensión espacial de la membrana y los compartimientos internos. El aumento del tamaño celular permite, hasta cierto punto, una mayor capacidad metabólica, mayor contenido informacional y mayor autonomía funcional. Existen ejemplos de células grandes y altamente complejas, como ciertas algas unicelulares (*Acetabularia*), protistas gigantes (*Gromia sphaerica*) y óvulos animales, que ilustran cómo la complejidad puede acumularse dentro de una sola célula hasta niveles elevados (Herrera-Paz, 2022; Gilbert, 2014). No obstante, la distribución empírica de tamaños celulares muestra que la mayoría de las células funcionales se concentran en un rango relativamente estrecho, muy por debajo de los tamaños máximos físicamente posibles (Czarnoleski & Verberk, 2025).

La restricción clásica más importante al crecimiento celular es la relación superficie–volumen. A medida que una célula aumenta su volumen, la superficie disponible para el intercambio de gases, nutrientes y desechos crece de manera sublineal según la relación $A=kV^{2/3}$, donde A es el área de la membrana celular y el volumen celular (Koch, 1996). Dado que la demanda metabólica total tiende a escalar aproximadamente con el volumen, mientras que la capacidad de intercambio está limitada por la superficie, este escalamiento desfavorable impone un límite funcional al tamaño celular, generando cuellos de botella en la difusión de nutrientes y la eliminación de productos de desecho.

A estas restricciones se suman limitaciones de transporte y control intracelular. En células pequeñas, la difusión es suficiente para distribuir metabolitos y señales regulatorias; sin embargo, a medida que el tamaño celular aumenta, los tiempos de difusión y las propiedades del citoplasma cambian de forma no lineal, volviéndose incompatibles con la regulación rápida y precisa requerida para mantener la homeostasis. Estudios recientes muestran que la difusión intracelular depende del tamaño celular y que las propiedades biocinéticas del citoplasma se reorganizan en células más grandes, afectando la movilidad de moléculas y la coordinación interna (Tan et al., 2013).

Desde luego, *Acetabularia*, *Gromia sphaerica* y otras células gigantes de vida libre excepcionales alcanzan tamaños extraordinarios valiéndose de arquitecturas altamente especializadas que permiten sortear parcialmente las

restricciones de transporte y control. Sin embargo, estas soluciones representan estados cercanos a la saturación funcional del nivel unicelular, más que trayectorias abiertas para una acumulación indefinida de complejidad. De manera similar, los óvulos animales alcanzan tamaños muy grandes en contextos altamente controlados y transitorios, sin constituir sistemas autosuficientes de larga duración.

En conjunto, las restricciones de intercambio superficial, transporte interno y control regulatorio conducen a una saturación progresiva del espacio evolutivo viable para células individuales. Aunque es posible aumentar la complejidad hasta tamaños celulares intermedios elevados, el crecimiento adicional se vuelve cada vez más costoso y funcionalmente ineficiente, limitando la acumulación sostenida de complejidad dentro de una sola célula.

La transición hacia un nuevo nivel organizacional ocurre cuando la complejidad se redistribuye mediante la cooperación y especialización de múltiples células. La multicelularidad permite resolver simultáneamente varias de las restricciones descritas al incrementar la superficie total de intercambio, reducir las distancias efectivas de transporte, distribuir funciones especializadas entre células diferenciadas y establecer formas más robustas de control y regulación a escala del conjunto (Czarnoleski & Verberk, 2025). Así, el organismo multicelular emerge como una solución estructural a las limitaciones de escala inherentes a las células individuales.

Este segundo caso refuerza el principio general identificado en el nivel molecular: las TEMI fraternas tienden a ocurrir cuando los sistemas operan en regímenes de tamaño intermedio cercanos a la saturación funcional del nivel inferior. En estos regímenes, las restricciones de escala no eliminan la viabilidad del sistema, pero canalizan la evolución de la complejidad hacia una reorganización en un nivel organizacional superior.

En la historia de la vida en la Tierra, el nivel unicelular dominó durante un intervalo extraordinariamente prolongado. La evidencia geológica y paleontológica sitúa la aparición de las primeras células entre ~3.8 y ~3.5 mil millones de años atrás, mientras que durante gran parte del Arcaico y el Proterozoico la biosfera estuvo compuesta casi exclusivamente por organismos unicelulares. Aunque existen evidencias recientes de eucariotas multicelulares simples en el Mesoproterozoico (~1.6 mil millones de años), estas formas tempranas no dieron lugar de inmediato a una diversificación amplia de organismos complejos. La emergencia y proliferación de multicelularidad compleja y macroscópica ocurrió de manera mucho más tardía, principalmente entre ~1.2 y ~0.8 mil millones de años atrás. Este extenso dominio unicelular sugiere que, durante miles de millones de años, la complejidad biológica se acumuló mayoritariamente dentro del nivel celular antes de redistribuirse hacia niveles organizacionales superiores (Westall, 2025; Miao et al., 2024). El salto a la multicelularidad fue dado por células eucariotas complejas que operaban en regímenes de tamaño intermedio, cercanos a la saturación funcional del nivel unicelular.

3. De insectos a colonias eusociales: restricciones de escala en organismos con exoesqueleto

Tras el establecimiento de la multicelularidad, la vida animal experimentó una expansión notable en diversidad morfológica, funcional y de tamaño corporal. En distintos linajes, la complejidad pudo acumularse durante largos intervalos evolutivos mediante el crecimiento corporal individual, dando lugar a organismos de dimensiones colosales (Rothier et al., 2025). Sin embargo, esta expansión no fue homogénea entre los distintos planes corporales, y en algunos grupos estuvo sujeta a restricciones particularmente severas.

En los artrópodos, y en especial en los insectos, el crecimiento corporal individual está limitado por la presencia de un exoesqueleto rígido. Aunque el exoesqueleto proporciona protección, soporte y anclaje muscular, introduce restricciones biomecánicas que no escalan favorablemente con el tamaño. A medida que aumenta la masa corporal, el peso del organismo escala más rápidamente que la resistencia mecánica del exoesqueleto, imponiendo un límite estructural al tamaño máximo viable de un individuo.

Desde una perspectiva alométrica, la resistencia del exoesqueleto depende del área de la sección transversal del material de soporte, que escala aproximadamente con el cuadrado de las dimensiones lineales ($A \propto L^2$) mientras que la masa corporal y el peso escalan con el cubo ($M \propto L^3$). Como resultado, el estrés mecánico aumenta con el tamaño corporal, imponiendo un escalamiento desfavorable para organismos con exoesqueleto rígido (Alexander, 1981; Campi & Scholtz, 2024). A tamaños progresivamente mayores, se compromete la integridad estructural, la eficiencia locomotora y la capacidad de soportar fuerzas dinámicas durante el movimiento. A estas limitaciones se suman restricciones fisiológicas asociadas al transporte interno y al intercambio gaseoso. En los insectos, el sistema traqueal distribuye oxígeno directamente a los tejidos, pero su eficiencia disminuye conforme aumentan las distancias internas, imponiendo límites adicionales al tamaño corporal (Woods & Casas, 2026).

El registro fósil documenta excepciones notables que ilustran los límites superiores del plan corporal artrópodo, como ciertas libélulas del Paleozoico con envergaduras muy superiores a las actuales. Sin embargo, estos casos estuvieron asociados a condiciones ambientales específicas y transitorias, como concentraciones elevadas de oxígeno atmosférico (Clapham et al., 2012), y representan estados cercanos al máximo viable del nivel individual, más que trayectorias abiertas para una expansión sostenida del tamaño.

En conjunto, estas restricciones biomecánicas y fisiológicas limitan severamente la posibilidad de seguir acumulando complejidad mediante el aumento del tamaño corporal individual en insectos. A diferencia de otros linajes multicelulares, los insectos alcanzaron relativamente temprano regímenes de tamaño intermedio cercano a la saturación funcional del nivel individual, en el cual el crecimiento adicional se vuelve inviable o extremadamente costoso.

Bajo estas condiciones, la evolución de la complejidad no se detuvo, sino que se canalizó hacia una reorganización en un nivel organizacional superior: la población. La formación de colonias eusociales en diversas especies de abejas, hormigas y termitas, permitió redistribuir la complejidad funcional entre múltiples individuos, cada uno de los cuales permaneció dentro de los límites estructurales impuestos por el exoesqueleto. La división del trabajo, la diferenciación de castas, la cooperación reproductiva y el desarrollo de infraestructuras colectivas transformaron a la colonia en una unidad funcional integrada, con propiedades emergentes no reducibles a las capacidades de un solo individuo. Así, la colonia eusocial puede interpretarse como una solución estructural a las limitaciones de escala del organismo individual en insectos, análoga a la multicelularidad en el nivel celular.

La evidencia paleontológica y filogenética indica que las primeras formas de eusocialidad surgieron al menos durante el Mesozoico temprano, hace aproximadamente 150–200 millones de años, con orígenes independientes en varios linajes, incluyendo himenópteros y termitas (Chouvenc et al., 2021; Boudinot et al., 2022). Al igual que en transiciones previas, este prolongado

intervalo evolutivo sugiere que la complejidad se acumuló durante millones de años dentro del nivel individual antes de que las restricciones estructurales canalizaran la evolución hacia una transición evolutiva mayor a nivel poblacional.

4. De mamíferos a ciudades: restricciones de escala en organismos con cerebro centralizado

Dentro del linaje de los vertebrados, los mamíferos exhiben un grado elevado de complejidad funcional, cognitiva y social (Dunbar & Shultz, 2007; MacLean et al., 2014). La multicelularidad avanzada, combinada con sistemas nerviosos centralizados y capacidades de aprendizaje, permitió la emergencia de comportamientos cooperativos, cuidado parental prolongado y estructuras sociales estables. En numerosos linajes de mamíferos, la complejidad pudo incrementarse durante largos intervalos evolutivos mediante el aumento del tamaño corporal, la expansión del cerebro y la sofisticación del comportamiento social.

Existen mamíferos de gran tamaño corporal y con cerebros grandes en términos absolutos, como elefantes y cetáceos, que muestran altos niveles de cognición, memoria y cooperación social (Sol et al., 2025). Asimismo, múltiples especies de primates y otros mamíferos sociales forman grupos cohesionados con jerarquías, comunicación compleja y aprendizaje social, evidenciando redes sociales estructuradas y comportamientos cooperativos estables (Silk, 2002; Dunbar & Schultz, 2007). Estos ejemplos demuestran que la cooperación y la vida social no son exclusivas del ser humano, ni requieren necesariamente la emergencia de estructuras supraindividuales complejas.

Sin embargo, en todos estos casos, la acumulación de complejidad dentro del nivel del organismo individual se ve limitada por restricciones estructurales y funcionales asociadas al tamaño corporal y cerebral. El cerebro es uno de los órganos más costosos energéticamente, y su aumento de tamaño impone demandas crecientes de energía, desarrollo y regulación térmica. Además, la conectividad neuronal, los tiempos de transmisión de señales y la coordinación de procesos cognitivos presentan escalamiento no lineal, generando rendimientos decrecientes a medida que el cerebro crece (Heldstab & Isler, 2022). Estas restricciones imponen un límite práctico a la complejidad cognitiva que puede acumularse dentro de un solo individuo.

El ser humano se sitúa en un régimen intermedio dentro del espectro de tamaños corporales y cerebrales de los mamíferos. No es el mamífero más grande ni el de mayor cerebro absoluto, pero se encuentra cerca de los límites funcionales impuestos por el costo energético del cerebro, las restricciones del desarrollo y las exigencias del control cognitivo centralizado. En este régimen, el aumento adicional de complejidad mediante la expansión del cuerpo o del cerebro individual se vuelve inviable o extremadamente costoso, aun cuando la presión selectiva favorezca formas más sofisticadas de cooperación y organización.

Bajo estas condiciones, la evolución de la complejidad en humanos no se canalizó hacia un aumento indefinido del tamaño o de la capacidad cognitiva individual, sino hacia una redistribución de la complejidad en un nivel organizacional superior. La externalización de la memoria, el procesamiento distribuido de la información, la división del trabajo cognitivo y el desarrollo de infraestructuras materiales y simbólicas permitieron la emergencia de comunidades humanas cada vez más complejas. Las ciudades, y posteriormente los estados y sistemas sociotecnológicos extensos, funcionan como unidades organizacionales supraindividuales, con propiedades emergentes que no pueden reducirse a las capacidades de un solo cerebro humano (Herrera-Paz, 2015; 2022).

Al igual que en las transiciones evolutivas previas, esta reorganización ocurrió cuando el sistema operaba en un régimen de tamaño intermedio cercano a la saturación funcional del nivel inferior. Otros mamíferos, aunque altamente sociales o de gran tamaño, no alcanzaron este régimen crítico o no desarrollaron los mecanismos necesarios para redistribuir la complejidad fuera del individuo. En el caso humano, la transición hacia sociedades complejas puede interpretarse como una TEMI fraterna en la que la complejidad dejó de acumularse predominantemente dentro del organismo individual y pasó a organizarse en estructuras colectivas, estableciendo un nuevo marco para su expansión sostenida.

Tabla 1. Transiciones evolutivas mayores medidas por restricciones de escala y reorganización de la complejidad

Nivel inferior (pretransición)	Variable de tamaño	Restricción de escala	Ejemplos cercanos al límite / excepciones	Régimen transicional (tamaño intermedio)	Nivel superior emergente	Marco temporal aproximado
Sistemas moleculares autoreplicantes	Longitud del polímero / masa molecular / información heredable	Inestabilidad estructural, difusión lenta, plegamiento, catástrofe del error	Ribozimas largas, proteínas grandes (titina), virus gigantes (mimivirus)	Moléculas funcionales complejas, pero aún replicables; genomas virales grandes con costos estructurales crecientes	Célula (compartimentalización, metabolismo integrado)	Sistemas moleculares ~4.0 Ga; primeras células ~3.8-3.5 Ga
Células individuales (unicelulares)	Volumen celular / área de membrana	Relación superficie-volumen, transporte interno, control regulatorio	Protistas gigantes, sincitos, óvulos animales	Células grandes con soluciones parciales (multinucleación, flujos citoplasmáticos)	Organismo multicelular (división del trabajo, tejidos)	Dominio unicelular ~3.5-1.2 Ga; multicelularidad compleja ~1.2-0.8 Ga
Organismo insecto individual	Masa corporal / dimensiones lineales	Soporte mecánico del esqueleto, intercambio gaseoso traqueal	Insectos gigantes paleozoicos, artrópodos grandes actuales	Tamaños corporales intermedios cercanos al máximo viable del plan artrópodo	Colonia eusocial (superorganismo poblacional)	Eusocialidad temprana ~200-150 Ma (Mesozoico)
Mamífero individual	Tamaño corporal y cerebral	Costos energéticos del cerebro, conectividad neuronal, control centralizado	Elefantes, cetáceos, primates altamente sociales	Humanos anatómicamente modernos cerca del límite cognitivo individual	Ciudad / sociedad compleja (cognición distribuida, infraestructura)	Sociedades complejas ~12-5 Ka; ciudades ~6-4 Ka

Gas-miles de millones de años; Ma-millones de años; Ka-miles de años

Tabla 1.

Resume la naturaleza de las restricciones en cada una de las cuatro transiciones expuestas en este trabajo.

Discusión y perspectivas

El marco propuesto aquí no se limita a los sistemas biológicos clásicos, sino que puede extrapolarse a sistemas socioculturales, tecnológicos, económicos y empresariales siempre que estos exhiban acumulación de complejidad, crecimiento en escala y restricciones estructurales asociadas al tamaño. En estos dominios, como en los sistemas vivos, la complejidad no aumenta indefinidamente dentro de un mismo nivel organizacional, sino que tiende a redistribuirse cuando los sistemas se aproximan a límites funcionales derivados de consideraciones de escala.

Un ejemplo lo constituyen las organizaciones humanas, como empresas, corporaciones y sistemas económicos complejos. Las firmas pueden crecer en tamaño, capital y número de empleados durante largos periodos, beneficiándose inicialmente de economías de escala, especialización interna y centralización de decisiones. Sin embargo, a medida que alcanzan tamaños elevados, comienzan a experimentar diseconomías de escala, manifestadas como rendimientos decrecientes asociados al aumento de los costos de coordinación, la burocratización, la latencia en la toma de decisiones, la sobrecarga informacional y la pérdida de control efectivo sobre procesos locales (Williamson, 1981; Canbäck et al., 2006). En este régimen, la complejidad deja de poder gestionarse eficientemente dentro de una sola entidad altamente integrada.

Cuando estas restricciones se intensifican, la complejidad organizacional no desaparece, sino que se reorganiza. En lugar de continuar creciendo como unidades monolíticas, las empresas tienden a fragmentarse funcionalmente o a integrarse en niveles superiores de organización –como conglomerados, consorcios, ecosistemas industriales, cadenas globales de valor o ecosistemas de plataforma– que operan como meta-organizaciones capaces de coordinar complejidad distribuida cuando la integración jerárquica alcanza rendimientos

decrecientes. En estos sistemas, funciones previamente integradas se redistribuyen entre múltiples entidades semiautónomas, coordinadas por infraestructuras comunes de información, regulación y mercado (Kretschmer et al., 2022; Liu et al., 2024). Este proceso es estructuralmente análogo a las transiciones evolutivas mayores observadas en sistemas biológicos, en tanto implica cooperación, especialización funcional y control distribuido.

Un patrón similar puede identificarse en la evolución histórica de las divisiones políticas. Las ciudades-estado, reinos e imperios lograron, en distintos momentos, expandirse hasta escalas enormes, acumulando complejidad administrativa, militar y económica; sin embargo, a medida que crecían enfrentaron crecientes problemas de gobernabilidad, latencia administrativa, fragilidad logística y pérdida de control sobre regiones periféricas, derivados de restricciones estructurales asociadas al escalamiento de la autoridad, la comunicación y la coordinación en espacios geográficos extensos (Turchin, 2016; Mann, 2012).

En este contexto, la emergencia de estados-nación, federaciones, confederaciones y, más recientemente, sistemas supranacionales y tratados multilaterales puede interpretarse como una redistribución de la complejidad política hacia niveles organizacionales superiores. Estas estructuras operan mediante mecanismos de soberanía compartida, regulación multinivel y cooperación institucional, permitiendo gestionar complejidad a escalas que resultarían ingobernables para unidades políticas completamente centralizadas.

Las ciudades constituyen otro ejemplo ilustrativo de esta dinámica. El crecimiento urbano genera ventajas alométricas bien documentadas, como mayor productividad, eficiencia energética e innovación. Sin embargo, a partir de ciertos umbrales emergen restricciones relacionadas con transporte, vivienda, sostenibilidad ambiental, cohesión social y capacidad administrativa. Cuando estas restricciones se aproximan a límites críticos, la complejidad urbana tiende a redistribuirse en sistemas metropolitanos, regionales o transnacionales, integrados por redes de ciudades y por infraestructuras compartidas que operan a escalas superiores. Un ejemplo de este proceso es la desconcentración concentrada, documentada en Costa Rica (Herrera-Paz, 2019), en la que funciones operativas y capacidades locales se redistribuyen territorialmente en el contexto de migraciones desde un núcleo urbano dominante hacia centros periféricos de menor tamaño, que comparten marcos regulatorios e infraestructuras críticas.

Desde una perspectiva prospectiva, este marco permite formular hipótesis sobre posibles transiciones futuras en la organización humana. Si las sociedades actuales continúan aumentando en complejidad e interdependencia, es plausible que se aproximen a restricciones estructurales asociadas a la capacidad del planeta para sostenerlas. En tal escenario, la complejidad adicional difícilmente podrá acumularse dentro de unidades organizacionales tradicionales –como ciudades o estados individuales– y podría redistribuirse hacia formas de organización supranacionales, o incluso planetarias, caracterizadas por infraestructuras globales, gobernanza distribuida y mecanismos de coordinación multinivel.

Estas posibles transiciones no deben interpretarse como inevitables ni teleológicas. Al igual que las TEMI biológicas, su ocurrencia dependerá de contingencias históricas, innovaciones institucionales y la capacidad de los sistemas para reorganizarse sin colapsar. No obstante, el marco de restricciones de escala y redistribución de complejidad ofrece una herramienta conceptual para identificar cuándo sistemas socioculturales, tecnológicos o

económicos se aproximan a regímenes transicionales y para comparar de manera sistemática las condiciones bajo las cuales podrían emerger nuevos niveles de organización.

En conjunto con factores energéticos, informacionales, infraestructurales y de división del trabajo descritos previamente (Herrera-Paz, 2026), este enfoque sugiere que las transiciones evolutivas mayores no constituyen eventos excepcionales confinados a la historia temprana de la vida, sino manifestaciones recurrentes de un patrón general en la evolución de sistemas complejos. La extrapolación cuidadosa de estos principios a dominios más allá de la biología y de contextos socioculturales, abre una vía prometedora para integrar la evolución de los sistemas complejos bajo un marco explicativo común.

Reconocimientos: El autor agradece a los participantes del seminario Batsheba De Rothschild "Evolución socio-tecnológica de la especie humana: ¿está la humanidad atravesando una transición evolutiva?" (<https://ste2019.net.technion.ac.il/program/>), celebrado en Safed, Israel, 2019, cuyas charlas inspiraron este trabajo.

Conflictos de interés: El autor declara que no tiene ningún conflicto de interés.

Referencias

- Abergel, C., & Claverie, J.-M. (2020). Giant viruses. *Current Biology*, 30(19), R1108–R1110. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.08.073>
- Alexander, R. M. (1981). Factors of safety in the structure of animals. *Science*, 211(4480), 132–138. <https://doi.org/10.1126/science.7444456>
- Allen, D. (2014). *How mechanics shaped the modern world*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-01701-3>
- Bettencourt, L. M. A., Yang, V. C., Lobo, J., Kempes, C. P., Rybski, D., & Hamilton, M. J. (2020). The interpretation of urban scaling analysis in time. *Journal of the Royal Society Interface*, 17(163), 20190846. <https://doi.org/10.1098/rsif.2019.0846>
- Boudinot, B. E., Richter, A., Katzke, J., Chaul, J. C. M., Keller, R. A., & Economo, E. P. (2022). Evidence for the evolution of eusociality in stem ants and a systematic revision of Gerontoformica (Hymenoptera: Formicidae). *Zoological Journal of the Linnean Society*, 195(4), 1355–1389. <https://doi.org/10.1093/zoolinnean/zlab097>
- Brown, J. H., Gillooly, J. F., Allen, A. P., Savage, V. M., & West, G. B. (2004). Toward a metabolic theory of ecology. *Ecology*, 85(7), 1771–1789. <https://doi.org/10.1890/03-9000>
- Campli, G., & Scholtz, C. H. (2024). The moulting arthropod: A complete genetic toolkit review. *Biological Reviews*, 99(2), 345–369. <https://doi.org/10.1111/brv.13123>
- Canbäck, S., Samouel, P., & Price, D. (2006). Do diseconomies of scale impact firm size and performance? A theoretical and empirical overview. *ICFAI Journal of Managerial Economics*, 4(1), 27–70. <https://ssrn.com/abstract=1267964>
- Carmel, Y., & Shavit, A. (2020). Operationalizing evolutionary transitions in individuality. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 287, 20192805. <https://doi.org/10.1098/rspb.2019.2805>
- Chouvenc, T., Su, N.-Y., & Robert, A. (2021). Termites emerged as eusocial wood-feeding roaches with extensive adaptive traits. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(3), e2021869118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2021869118>
- Clapham, M. E., Karr, J. D., & Berner, R. A. (2012). Environmental and biotic controls on the evolutionary history of insect body size. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(Suppl. 1), 16246–16251. <https://doi.org/10.1073/pnas.1204026109>
- Cui, J., Schlub, T. E., & Holmes, E. C. (2014). An allometric relationship between the genome length and virion volume of viruses. *Journal of Virology*, 88(11), 6403–6410. <https://doi.org/10.1128/JVI.00362-14>
- Czarnoleski, M., & Verberk, W. C. E. P. (2025). Cell size matters: A unifying theory across the tree of life. *Trends in Ecology & Evolution*, 40(11), 1113–1125. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2025.09.003>
- Dagan, T., & Martin, W. (2023). The last universal common ancestor between ancient Earth chemistry and the onset of genetics. *Journal of Molecular Evolution*, 91(6), 529–542. <https://doi.org/10.1007/s00239-023-10114-6>
- Dill, K. A., & MacCallum, J. L. (2012). The protein-folding problem, 50 years on. *Science*, 338(6110), 1042–1046. <https://doi.org/10.1126/science.1219021>
- Dobson, C. M. (2003). Protein folding and misfolding. *Nature*, 426(6968), 884–890. <https://doi.org/10.1038/nature02261>
- Dunbar, R. I. M., & Shultz, S. (2007). Evolution in the social brain. *Science*, 317(5843), 1344–1349. <https://doi.org/10.1126/science.1145463>
- Eigen, M., McCaskill, J., & Schuster, P. (1989). The molecular quasi-species. *Advances in Chemical Physics*, 75, 149–263. <https://doi.org/10.1002/9780470142578.ch4>
- Ellis, R. J. (2001). Macromolecular crowding: Obvious but underappreciated. *Trends in Biochemical Sciences*, 26(10), 597–604. [https://doi.org/10.1016/S0968-0004\(01\)01938-7](https://doi.org/10.1016/S0968-0004(01)01938-7)
- Gianni, E., Kwok, S. L. Y., Wan, C. J. K., Goeij, K., Clifton, B. E., Colizzi, E. S., Attwater, J., & Holliger, P. (2026). A small polymerase ribozyme that can synthesize itself and its complementary strand. *Science*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1126/science.adt2760>
- Gilbert, S. F. (2014). *Developmental biology* (10th ed.). Sinauer Associates.
- Gómez-Márquez, J. (2025). The origin of life and cellular systems: A continuum from prebiotic chemistry to biodiversity. *Life*, 15(11), 1745. <https://doi.org/10.3390/life15111745>
- Hadarovich, A., Kuster, D., Romero Romero, M. L., & Toth-Petroczy, A. (2026). The evolution of biomolecular condensates. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 41, 403–432. <https://doi.org/10.1146/annurev-cellbio-101123-051723>
- Heldstab, S. A., & Isler, K. (2022). The economics of brain size evolution in vertebrates. *Current Biology*, 32(13), R697–R708. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.04.096>
- Herrera-Paz, E. F. (2015). *Superorganismo universal: Una teoría de la evolución a la complejidad*. CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Herrera-Paz, E. F. (2022). A universal trend: Non-living, biological, and sociocultural/technological transitions in evolution towards complexity. *ResearchGate Preprint*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19212.80003/2>
- Herrera-Paz, E. F. (2019). Biodemography research and the history of Central American and northwestern South American populations. En D. H. Ubelaker & S. E. Colantonio (Eds.), *Biological anthropology of Latin America: Historical development and recent advances* (Smithsonian Contributions to Anthropology No. 51, pp. 127–148). Smithsonian Institution Scholarly Press.
- Herrera-Paz, E. F. (2025). Is humanity undergoing a transition to reproductive specialization? Insights on the evolution of modern societies to superorganisms. *Revista Médica del Hospital General de México*, 88, 88–95. <https://doi.org/10.24875/HGMX.24000001>
- Herrera-Paz, E. F. (2026). Evolución de la multicelularidad y de las sociedades humanas complejas: Los factores comunes en ambas transiciones. *Innovare*, 15(1), 1–13. <https://doi.org/10.69845/innovare.v15i1.576>
- Kempes, C. P., Koehl, M. A. R., & West, G. B. (2019). The scales that limit: The physical boundaries of evolution. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7, 242. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00242>
- Koch, A. L. (1996). What size should a bacterium be? A question of scale. *Annual Review of Microbiology*, 50, 317–348. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.50.1.317>
- Kretschmer, T., Leiponen, A., Schilling, M., & Vasudeva, G. (2022). Platform ecosystems as meta-organizations: Implications for platform strategies. *Strategic Management Journal*, 43(2), 405–424. <https://doi.org/10.1002/smj.3250>

Referencias

- Linke, W. A. (2008). Sense and stretchability: The role of titin and titin-associated proteins in myocardial stress-sensing and mechanical dysfunction. *Cardiovascular Research*, 77(4), 637–648. <https://doi.org/10.1016/j.cardiores.2007.03.029>
- Liu, Z., Li, Z., Zhang, Y., Mutukumira, A. N., Feng, Y., Cui, Y., & Wang, S. (2024). Comparing business, innovation, and platform ecosystems: A systematic review of the literature. *Biomimetics*, 9(4), 216. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9040216>
- MacLean, E. L., Matthews, L. J., Hare, B., Nunn, C. L., Anderson, R. C., Aureli, F., et al. (2014). The evolution of self-control. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(20), E2140–E2148. <https://doi.org/10.1073/pnas.1323533111>
- Mann, M. (2012). *The sources of social power: Volume 1. A history of power from the beginning to AD 1760*. Cambridge University Press.
- Maynard Smith, J., & Szathmáry, E. (1995). *The major transitions in evolution*. Oxford University Press.
- Miao, L., Zhu, S., Yin, Z., Cui, H., & Yuan, X. (2024). A multicellular eukaryote from the early Mesoproterozoic and the origin of multicellularity. *Science Advances*, 10(4), eadk3208. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adk3208>
- Noller, H. F. (2012). Evolution of protein synthesis from an RNA world. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 4(4), a003681. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a003681>
- Rothier, P. S., Herrel, A., Benson, R. B. J., & Hedrick, B. P. (2025). Body mass evolution as a driver of morphological and ecological diversity in terrestrial mammals. *BMC Ecology and Evolution*, 25, 120. <https://doi.org/10.1186/s12862-025-02393-9>
- Sánchez Garduño, F., & Gutiérrez Sánchez, J. L. (2020). La alometría, una ley de potencias ubicua en la estructura de los seres vivos. *INTER DISCIPLINA*, 8(20), 11–22. <https://doi.org/10.22201/ceich.24485705e.2020.20.71181>
- Savage, V. M., Gillooly, J. F., Brown, J. H., West, G. B., & Charnov, E. L. (2004). The predominance of quarter-power scaling in biology. *Functional Ecology*, 18(2), 257–282. <https://doi.org/10.1111/j.0269-8463.2004.00856.x>
- Shajani, Z., Sykes, M. T., & Williamson, J. R. (2011). Assembly of bacterial ribosomes. *Annual Review of Biochemistry*, 80, 501–526. <https://doi.org/10.1146/annurev-biochem-062608-160432>
- Silk, J. B. (2007). The adaptive value of sociality in mammalian groups. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 362(1480), 539–559. <https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1994>
- Sol, D., Bateman-Neubert, A., Noguera, L., & Taylor, A. H. (2025). The evolutionary puzzle of cognition: Challenges and insights from individual-based studies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 380(1929), 20240123. <https://doi.org/10.1098/rstb.2024.0123>
- Tan, C., Saurabh, S., Bruchez, M. P., Schwartz, R., & Leduc, P. (2013). Molecular crowding shapes gene expression in synthetic cellular nanosystems. *Nature Nanotechnology*, 8, 602–608. <https://doi.org/10.1038/nnano.2013.132>
- Turchin, P. (2016). *Ultrasociety: How 10,000 years of war made humans the greatest cooperators on Earth*. Beresta Books.
- West, G. B., Woodruff, W. H., & Brown, J. H. (2002). Allometric scaling of metabolic rate from molecules and mitochondria to cells and mammals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(Suppl. 1), 2473–2478. <https://doi.org/10.1073/pnas.012579799>
- West, G. B., Brown, J. H., & Enquist, B. J. (1997). A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. *Science*, 276(5309), 122–126. <https://doi.org/10.1126/science.276.5309.122>
- West, G. B., Brown, J. H., & Enquist, B. J. (1999). The fourth dimension of life: Fractal geometry and allometric scaling of organisms. *Science*, 284(5420), 1677–1679. <https://doi.org/10.1126/science.284.5420.1677>
- Westall, F. (2025). What the earliest evidence for life tells us about the early Earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 380(1974), 20240106. <https://doi.org/10.1098/rstb.2024.0106>
- Williamson, O. E. (1981). The economics of organization: The transaction cost approach. *American Journal of Sociology*, 87(3), 548–577. <https://doi.org/10.1086/227496>
- Woods, H. A., & Casas, J. (2026). Architecture of the insect tracheal system driven by spatially varying limitation of oxygen and carbon dioxide transport. *Journal of the Royal Society Interface*, 23(234), 20250420. <https://doi.org/10.1098/rsif.2025.0420>
- Zhang, J. (2000). Protein-length distributions for the three domains of life. *Trends in Genetics*, 16(3), 107–109. [https://doi.org/10.1016/S0168-9525\(99\)01922-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9525(99)01922-8)

Nasoangiofibroma juvenil y protocolo EMGS-MURILLO

Juvenile Nasopharyngeal Angiofibroma and EMGS-MURILLO Protocol

Juan José Guifarro Sierra Elmer Roberto Mendez Romero 

Resumen

Objetivo: Describir las características clínicas, quirúrgicas y perioperatorias de una serie retrospectiva de pacientes con angiofibroma nasofaríngeo juvenil tratados mediante el Protocolo EMGS-MURILLO en un hospital público con recursos tecnológicos limitados. **Materiales y métodos:** Se realizó un estudio observacional, retrospectivo y descriptivo de 20 pacientes con diagnóstico histopatológico confirmado de angiofibroma nasofaríngeo juvenil, intervenidos en el Servicio de Cirugía Oral y Maxilofacial del Hospital Escuela, Tegucigalpa, Honduras, durante un período de cinco años. Todos los pacientes fueron tratados mediante el Protocolo EMGS-MURILLO, que integra ligadura de la arteria carótida externa ipsilateral e infiltración intratumoral de ácido tranexámico y peróxido de hidrógeno en proporción 1:1. Se incluyeron cuatro casos ilustrativos con registro fotográfico quirúrgico completo. **Resultados:** La edad media fue de $18,9 \pm 3,9$ años; 17/20 pacientes fueron del sexo masculino y 3/20 del sexo femenino. El abordaje Weber-Ferguson se empleó en 11/20 casos y otro abordaje transfacial en 9/20. El tiempo quirúrgico promedio fue de $116,3 \pm 29,1$ minutos y el sangrado intraoperatorio promedio fue de $138,8 \pm 41,6$ mL. Se documentaron complicaciones postoperatorias en 2/20 pacientes: una infección tardía y una exposición de material de osteosíntesis. No se registró necesidad de transfusión sanguínea ni recurrencia tumoral durante el seguimiento consignado. **Conclusiones:** El Protocolo EMGS-MURILLO mostró un perfil hemostático favorable y una baja frecuencia de complicaciones en el manejo quirúrgico abierto del angiofibroma nasofaríngeo juvenil.

Palabras clave: angiofibroma; nasofaringe; peróxido de hidrógeno; ácido tranexámico; reporte de caso

Abstract

Objective: To describe the clinical, surgical, and perioperative characteristics of a retrospective series of patients with juvenile nasopharyngeal angiofibroma treated with the EMGS-MURILLO Protocol in a public hospital with limited technological resources. **Materials and methods:** An observational, retrospective, descriptive study was conducted in 20 patients with histopathologically confirmed juvenile nasopharyngeal angiofibroma who underwent surgery at the Department of Oral and Maxillofacial Surgery of Hospital Escuela, Tegucigalpa, Honduras, over a five-year period. All patients were treated using the EMGS-MURILLO Protocol, which integrates ipsilateral external carotid artery ligation and intratumoral infiltration of tranexamic acid and hydrogen peroxide in a 1:1 ratio. Four illustrative cases with complete surgical photographic records were included. **Results:** The mean age was 18.9 ± 3.9 years; 17/20 patients were male and 3/20 were female. The Weber-Ferguson approach was used in 11/20 cases and another transfacial approach in 9/20. The mean operative time was 116.3 ± 29.1 minutes, and the mean intraoperative blood loss was 138.8 ± 41.6 mL. Postoperative complications were documented in 2/20 patients: one late infection and one osteosynthesis material exposure. No blood transfusions or tumor recurrences were recorded during the documented follow-up. **Conclusions:** The EMGS-MURILLO Protocol showed a favorable hemostatic profile and a low complication frequency for open surgical management of juvenile nasopharyngeal angiofibroma.

Keywords: angiofibroma; nasopharyngeal neoplasms; epistaxis; tranexamic acid; case report

Introducción

El angiofibroma nasofaríngeo juvenil (ANJ) es una neoplasia fibrovascular benigna, infrecuente y de comportamiento localmente agresivo. Se origina típicamente en la región posterolateral de la cavidad nasal, en las inmediaciones del foramen esfenopalatino, y se presenta de manera predominante en adolescentes varones, con un pico de incidencia entre los 14 y 18 años^(1,2). A pesar de su naturaleza histológicamente benigna, el tumor puede extenderse hacia la cavidad nasal, los senos paranasales, la fosa pterigopalatina, la fosa infratemporal, la órbita y la base del cráneo, lo que explica su relevancia clínica y quirúrgica⁽¹⁻³⁾.

Las manifestaciones clínicas más frecuentes incluyen epistaxis recurrente y obstrucción nasal unilateral progresiva. La tendencia al sangrado se relaciona con la naturaleza hipervascular del tumor y con la fragilidad de sus vasos, mientras que la progresión local puede generar deformidad facial, hipoacusia conductiva por obstrucción de la trompa de Eustaquio, proptosis y síntomas neurológicos cuando existe extensión hacia la base del cráneo^(3,4).

La resección quirúrgica completa constituye el tratamiento de elección del ANJ. En centros con recursos avanzados, la embolización preoperatoria selectiva seguida de resección endoscópica endonasal se ha consolidado como una estrategia capaz de reducir la pérdida sanguínea intraoperatoria, mejorar la visualización del campo quirúrgico y disminuir la morbilidad postoperatoria⁽⁵⁻⁷⁾. Sin embargo, en sistemas de salud con limitaciones tecnológicas o acceso restringido a radiología intervencionista, la resección mediante abordajes abiertos continúa siendo una alternativa necesaria, y el control hemostático intraoperatorio sigue siendo uno de los principales retos técnicos⁽⁸⁾.

Frente a este escenario, el Servicio de Cirugía Oral y Maxilofacial del Hospital Escuela (HE) desarrolló el Protocolo EMGS-MURILLO como estrategia hemostática multimodal para el manejo abierto del ANJ. El protocolo combina la ligadura intraoperatoria de la arteria carótida externa ipsilateral con la infiltración intratumoral de una solución de ácido tranexámico (TXA) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en proporción 1:1. La justificación del TXA se sustenta en su efecto antifibrinolítico, al bloquear los sitios de unión de lisina en el plasminógeno e inhibir su conversión a plasmina, preservando así la estabilidad del coágulo de fibrina^(9,10). El posible aporte del H_2O_2 debe interpretarse con prudencia: su uso quirúrgico se ha relacionado principalmente con limpieza local por efervescencia y mejor exposición del lecho operatorio, mientras que sus mecanismos hemostáticos directos derivan de evidencia experimental e indirecta y no han sido plenamente establecidos^(11,12).

En este contexto, el presente estudio se plantea como una serie retrospectiva de 20 pacientes con diagnóstico histopatológico confirmado de ANJ, intervenidos mediante el Protocolo EMGS-MURILLO en el HE durante un periodo de cinco años. Adicionalmente, se incluye una descripción integrada de cuatro casos ilustrativos seleccionados por contar con registro fotográfico quirúrgico completo, con el objetivo de documentar de manera secuencial la técnica quirúrgica y su reproducibilidad. El objetivo fue describir las características clínicas, imagenológicas y quirúrgicas de la serie, así como los desenlaces perioperatorios y de seguimiento, particularmente el sangrado intraoperatorio, el tiempo quirúrgico, las complicaciones asociadas al procedimiento, la necesidad de transfusión y la recurrencia tumoral.

Diseño del estudio y ámbito

Se llevó a cabo un estudio observacional, retrospectivo y descriptivo en el Servicio de Cirugía Oral y Maxilofacial del HE, Tegucigalpa, Honduras. El análisis incluyó una serie de 20 pacientes con diagnóstico histopatológico confirmado de ANJ intervenidos quirúrgicamente durante los cinco años previos a la recolección de los datos, realizado por los integrantes del Servicio de Cirugía Oral y Maxilofacial del HE, todos tratados bajo el Protocolo EMGS-MURILLO.

Este documento combina el análisis global de la serie retrospectiva con la descripción integrada de cuatro casos ilustrativos seleccionados por su valor docente y por contar con documentación fotográfica quirúrgica completa. Esta organización permite separar dos niveles de análisis: por un lado, la evaluación descriptiva de la cohorte completa; por otro, la exposición narrativa y visual de la secuencia operatoria en casos representativos.

Población y criterios de selección

Los criterios de inclusión fueron: (1) diagnóstico histopatológico confirmado de ANJ posterior a la resección quirúrgica; (2) intervención realizada bajo el Protocolo EMGS-MURILLO; y (3) expediente clínico completo con información disponible para las variables principales del estudio. Se excluyeron pacientes manejados con una estrategia quirúrgica diferente al protocolo evaluado, expedientes incompletos y casos con seguimiento postoperatorio insuficiente para evaluar recurrencia. Todos los casos, incluidos los tres pacientes del sexo femenino, contaron con confirmación histopatológica posterior a la resección.

Procedimiento quirúrgico

El Protocolo EMGS-MURILLO se aplicó de forma sistemática en los pacientes incluidos. La secuencia operatoria comprendió: (I) Ligadura de la arteria carótida externa ipsilateral por el Servicio de Cirugía Vascular, previo al abordaje maxilofacial; (II) Diseño e incisión del abordaje transfacial correspondiente, incluyendo Weber-Ferguson cuando estuvo indicado, con disección por planos hasta el nivel óseo; (III) Osteotomías selectivas del complejo órbita-maxilar para la exposición tumoral; (IV) Infiltración intratumoral de una solución combinada de TXA/ H_2O_2 en proporción 1:1; (V) Resección tumoral macroscópica con preservación de las estructuras anatómicas adyacentes; y (VI) Reconstrucción esquelética con material de osteosíntesis y cierre por planos anatómicos.

Variables

Las variables analizadas incluyeron edad, sexo, estadio tumoral según la clasificación de Radkowski, tipo de abordaje quirúrgico, tiempo quirúrgico total en minutos, volumen de sangrado intraoperatorio en mililitros, necesidad de transfusión sanguínea, complicaciones intraoperatorias y postoperatorias, y recurrencia tumoral durante el seguimiento que fue medida por visitas periódicas del paciente a control y sus estudios imagenológicos (media $\pm$ 2 años) consignado en el expediente clínico.

Tamaño muestral

El tamaño de la muestra estuvo determinado por la totalidad de pacientes disponibles que cumplieron los criterios de inclusión durante el periodo de estudio. No se realizó cálculo previo de poder estadístico debido al carácter retrospectivo y descriptivo de la serie.

Control de sesgos

Dado el diseño retrospectivo, se reconoce la posibilidad de sesgo de selección y de información. Para reducir este riesgo, se incluyeron únicamente pacientes con diagnóstico histopatológico confirmado y expedientes clínicos con información suficiente para las variables principales.

La interpretación de los hallazgos se realizó con cautela, considerando el tamaño muestral reducido y la ausencia de grupo control.

Análisis de datos

Los datos fueron procesados y analizados con Jamovi v2.7.18 ⁽¹³⁾. Se calcularon medidas de tendencia central y dispersión para variables continuas, así como frecuencias absolutas para variables categóricas. De forma exploratoria, se compararon el tiempo quirúrgico y el sangrado intraoperatorio según el tipo de abordaje mediante prueba de Mann-Whitney. No se incluyeron modelos multivariados debido al tamaño muestral y al carácter principalmente descriptivo de la serie.

Consideraciones éticas

Se consideró que la aprobación ética estaba exenta, dado que este estudio presenta casos clínicos sin intervención experimental. Los casos están completamente anonimizados y se llevaron a cabo de conformidad con las directrices institucionales que incluyen la firma de un consentimiento informado.

Resultados

Se analizaron 20 pacientes con diagnóstico histopatológico confirmado de ANJ que cumplieron los criterios de inclusión. De estos, cuatro casos fueron seleccionados como ilustrativos por disponer de documentación fotográfica quirúrgica completa que permitía mostrar de forma secuencial la aplicación del Protocolo EMGS-MURILLO.

La edad media fue de 18,9 ± 3,9 años, con mediana de 20 años y rango intercuartílico de 15,8-21,3 años. Diecisiete de los 20 pacientes fueron del sexo masculino y tres fueron del sexo femenino. El abordaje Weber-Ferguson se empleó en 11 pacientes, mientras que en nueve se utilizó otro abordaje transfacial. El tiempo quirúrgico medio fue de 116,3 ± 29,1 minutos y el sangrado intraoperatorio medio fue de 138,8 ± 41,6 mL (Tabla 1).

Variable	n	Media ± DE	Mediana (RIC)
Edad (años)	20	18,9 ± 3,9	20 (15,8-21,3)
Sexo masculino	17/20	—	—
Sexo femenino	3/20	—	—
Abordaje Weber-Ferguson	11/20	—	—
Clasificación de Radkowski Estadio IA	15/20	—	—
Clasificación de Radkowski Estadio IB	5/20	—	—
Otro abordaje transfacial	9/20	—	—
Tiempo quirúrgico (min)	20	116,3 ± 29,1	110 (97,5-132,5)
Sangrado intraoperatorio (mL)	20	138,8 ± 41,6	135 (107,5-170)
Sin transfusión sanguínea	20/20	—	—
Complicaciones postoperatorias	2/20	—	—
Infección postoperatoria tardía	1/20	—	—
Exposición de material de osteosíntesis	1/20	—	—

Tabla 1: Características clínicas, quirúrgicas y postoperatorias de la serie

DE: desviación estándar; RIC: rango intercuartílico; mL: mililitros. Fuente: Servicio de Cirugía Oral y Maxilofacial, HE, Tegucigalpa, Honduras.

Los pacientes intervenidos mediante Weber-Ferguson presentaron un tiempo quirúrgico ligeramente mayor que aquellos tratados mediante otro abordaje transfacial (125,9 vs. 104,4 minutos), aunque esta diferencia no alcanzó significación estadística (p = 0,085). El sangrado intraoperatorio fue similar entre ambos grupos (141,0 vs. 136,1 mL; p = 0,819). No se registró necesidad de transfusión sanguínea en ninguno de los casos.

Las complicaciones postoperatorias se documentaron en 2/20 pacientes, ambos pertenecientes al grupo tratado con Weber-Ferguson: un caso de infección postoperatoria tardía y un caso de exposición de material de osteosíntesis. Ambas complicaciones fueron manejadas de manera conservadora y evolucionaron favorablemente. No se registraron complicaciones neurológicas, fístulas ni hemorragias postoperatorias significativas.

No se registraron recurrencias tumorales durante el período de seguimiento designado de 24 meses posterior cirugía. Este periodo se estableció con base en la literatura, que señala que las recurrencias pueden presentarse a partir de los siete meses posteriores al procedimiento quirúrgico ⁽¹⁹⁾.

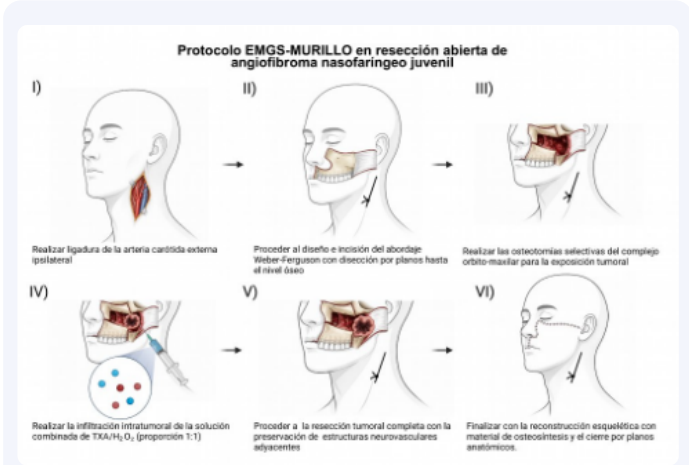


Figura 1: Secuencia esquemática del Protocolo EMGS-MURILLO para la resección abierta del angiofibroma nasofaríngeo juvenil

El protocolo incluye: I) ligadura de la arteria carótida externa ipsilateral; II) diseño e incisión del abordaje Weber-Ferguson con disección por planos hasta el nivel óseo; III) osteotomías selectivas del complejo órbita-maxilar para la exposición tumoral; IV) infiltración intratumoral de solución combinada de ácido tranexámico y peróxido de hidrógeno en proporción 1:1; V) resección tumoral macroscópica con preservación de las estructuras anatómicas adyacentes; y VI) reconstrucción esquelética con material de osteosíntesis y cierre por planos anatómicos.

Casos ilustrativos

Con el fin de complementar los resultados globales de la serie, se integran cuatro casos ilustrativos con documentación fotográfica completa, sin que estos sustituyan el análisis de la cohorte total. En el caso ilustrativo 1, un paciente adolescente de sexo masculino consultó por aumento progresivo del tercio medio facial, alteración del contorno geniano y epistaxis crónica recurrente; la tomografía contrastada mostró una lesión hipervascular con ocupación de la cavidad nasal, compromiso del seno maxilar y extensión hacia la fosa pterigopalatina, por lo que se realizó ligadura de la arteria carótida externa izquierda, abordaje Weber-Ferguson, osteotomías selectivas,

infiltración intratumoral de TXA/H₂O₂, resección macroscópica, reconstrucción con sistema de osteosíntesis 2.0 mm y cierre por planos (Figura 2).

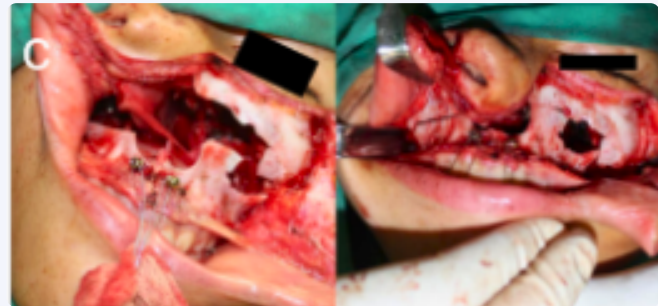


Figura 2: Caso ilustrativo 1 tratado mediante el Protocolo EMGS- MURILLO

a. Fotografías clínicas preoperatorias que muestran aumento de volumen del tercio medio facial con alteración del contorno facial.



b. Diseño del abordaje Weber-Ferguson y exposición quirúrgica del complejo mediofacial tras la elevación del colgajo.



c. Campo operatorio posterior a las osteotomías selectivas y exposición del lecho quirúrgico.



d. Reconstrucción del complejo mediofacial mediante material de osteosíntesis. **e.** Aspecto postoperatorio inmediato posterior al cierre por planos.

En el caso ilustrativo 2, un paciente masculino en la segunda década de vida presentó epistaxis recurrente y obstrucción nasal unilateral progresiva; la tomografía y la angiotomografía confirmaron una lesión hipervascular de origen nasofaríngeo con extensión hacia la fosa pterigopalatina, sin evidencia de compromiso intracraneal, y el protocolo permitió una exposición amplia del campo operatorio, control hemostático local y reconstrucción del segmento intervenido (Figura 3).

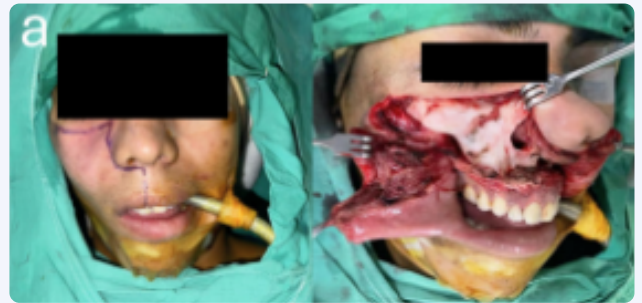
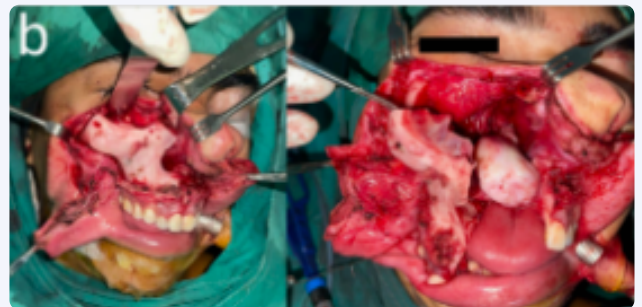
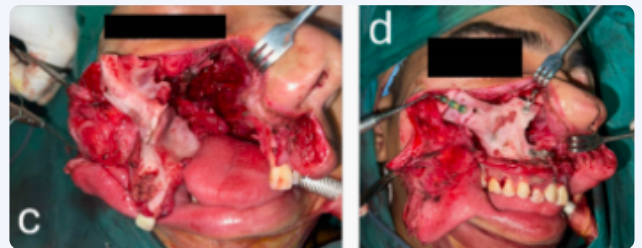


Figura 3: Caso ilustrativo 2 tratado mediante abordaje abierto y aplicación del Protocolo EMGS-MURILLO.

a. Diseño del abordaje facial y exposición inicial del complejo mediofacial tras la disección por planos.



b. Exposición amplia del campo operatorio mediante osteotomías selectivas, con visualización del componente tumoral.



c. Campo quirúrgico durante la fase de resección tumoral. **d.** Reconstrucción del segmento intervenido con material de osteosíntesis.

En el caso ilustrativo 3, el paciente presentó obstrucción nasal unilateral, aumento de volumen facial con distorsión del contorno del hemicara afectado y episodios repetidos de epistaxis; la valoración multidisciplinaria incluyó Neurocirugía y Cirugía Vascular, y la secuencia operatoria documentó el trazado del Weber-Ferguson, la exposición tumoral, la infiltración bajo visión directa y la reconstrucción con material de osteosíntesis (Figura 4).

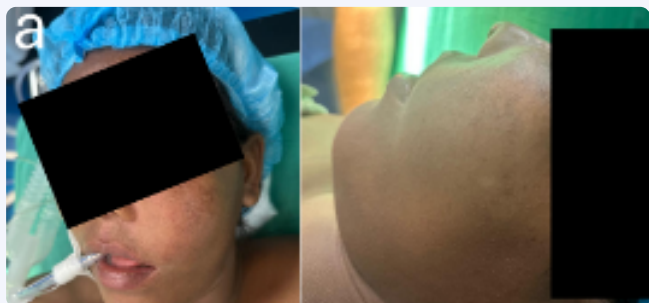
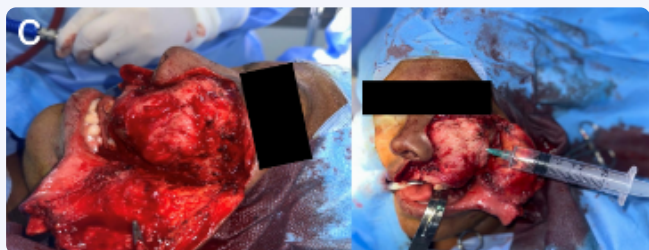


Figura 4: Caso ilustrativo 3 tratado mediante el Protocolo EMGS-MURILLO

a. Fotografías clínicas e intraoperatorias iniciales que muestran el diseño del abordaje y la exposición del complejo mediofacial.



b. Exposición quirúrgica amplia del tumor tras la elevación del colgajo y las osteotomías selectivas.



c. Infiltración intratumoral bajo visión directa de la solución combinada TXA/H₂O₂ en proporción 1:1.



d. Lecho quirúrgico posterior a la resección macroscópica de la lesión y reconstrucción inicial del complejo mediofacial.

En el caso ilustrativo 4, el paciente consultó por epistaxis recurrente, obstrucción nasal unilateral y masa nasofaríngea confirmada por tomografía contrastada; el abordaje transfacial permitió exponer el sitio afectado, realizar la infiltración intratumoral previa a la disección y verificar el lecho quirúrgico sin lesión macroscópica evidente posterior a la exéresis (Figura 5). En conjunto, las imágenes de los cuatro casos documentan la aplicación secuencial del Protocolo EMGS-MURILLO y respaldan su utilidad como estrategia quirúrgica reproducible en el contexto institucional descrito.

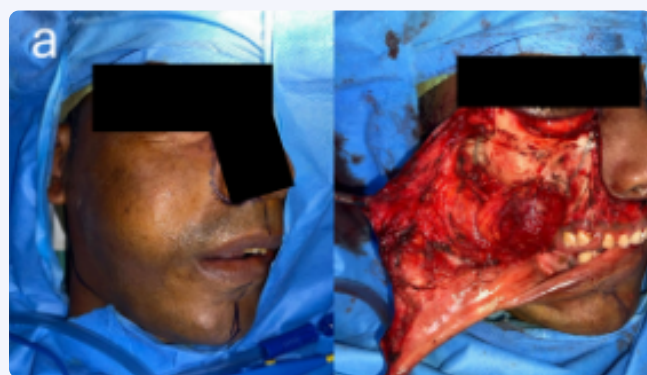
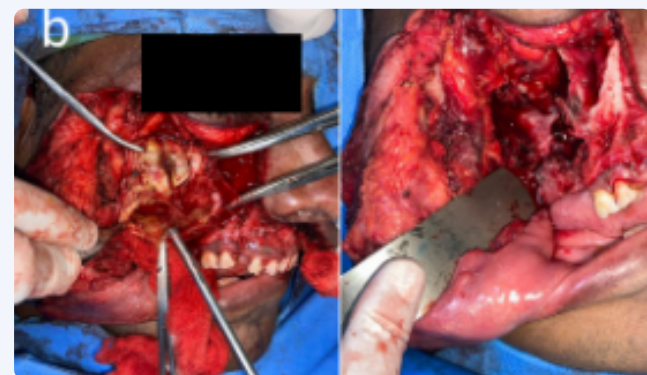


Figura 5: Caso ilustrativo 4 tratado mediante abordaje abierto.

a. Diseño del abordaje facial y exposición quirúrgica inicial del sitio afectado.



b. Campo operatorio durante la resección tumoral y visualización del lecho quirúrgico posterior a la exéresis macroscópica de la lesión.

Discusión

La presente serie retrospectiva sugiere que el Protocolo EMGS-MURILLO constituye una estrategia quirúrgica factible para el manejo abierto del ANJ en un hospital público con recursos tecnológicos limitados. El sangrado intraoperatorio medio de $138,8 \pm 41,6$ mL observado en esta serie es inferior al reportado en series históricas de resección abierta sin embolización preoperatoria, en las que las pérdidas sanguíneas pueden oscilar entre 500 y 2.000 mL dependiendo del estadio tumoral^(5,6,8). No obstante, esta comparación debe interpretarse con cautela por las diferencias metodológicas entre estudios, la ausencia de grupo control y el tamaño muestral reducido de la presente serie.

Aunque no se planteó un análisis multivariado en esta versión del manuscrito, la literatura reconoce que la extensión tumoral y el patrón de vascularización son determinantes relevantes del sangrado y de la morbilidad quirúrgica en el ANJ⁽⁷⁾. Por ello, los pacientes con enfermedad más extensa requieren planificación preoperatoria rigurosa, disponibilidad de hemoderivados y

coordinación multidisciplinaria, especialmente cuando no se dispone de embolización preoperatoria.

La ligadura de la arteria carótida externa como primer tiempo quirúrgico busca reducir la presión de perfusión del lecho tumoral, particularmente al interrumpir el aporte de ramas dependientes de la arteria maxilar interna. La literatura ha documentado reducción del sangrado intraoperatorio con esta maniobra en contextos donde la embolización preoperatoria no está disponible o no es factible⁽⁸⁾. En el presente protocolo, la participación del Servicio de Cirugía Vascular constituye un componente relevante de seguridad y estandarización técnica.

La infiltración intratumoral de TXA/H₂O₂ es el componente distintivo del protocolo. El TXA cuenta con fundamento farmacológico sólido como antifibrinolítico, y su utilidad para reducir sangrado ha sido evaluada en cirugía endoscópica sinusal y otros escenarios quirúrgicos^(9,10,14,15). Por el contrario, el papel del H₂O₂ en este contexto debe formularse de manera prudente. Aunque se ha descrito su uso quirúrgico y su capacidad de facilitar limpieza local por efervescencia^(11,12), los mecanismos hemostáticos directos aplicados al ANJ no están completamente establecidos. Por tanto, el efecto combinado de TXA/H₂O₂ debe considerarse una hipótesis clínica derivada de esta experiencia institucional y no una conclusión mecanística definitiva.

La ausencia de transfusiones y de recurrencias durante el seguimiento consignado constituye un hallazgo favorable. Sin embargo, la recurrencia del ANJ puede presentarse de forma tardía y se ha asociado principalmente con resección incompleta y enfermedad avanzada^(16,17). Por esta razón, la interpretación de la recurrencia exige reportar con precisión la duración del seguimiento y mantener vigilancia clínica e imagenológica prolongada.

Las complicaciones registradas fueron locales, de baja frecuencia y con evolución favorable. La frecuencia de complicaciones observada se encuentra dentro de rangos clínicamente aceptables para abordajes abiertos, aunque la comparación con otras series debe realizarse con prudencia por diferencias en estadio tumoral, abordaje, disponibilidad de embolización, experiencia quirúrgica y criterios de registro de eventos adversos⁽¹⁸⁾.

El enfoque híbrido del manuscrito aporta valor clínico y docente. La serie permite describir resultados globales, mientras que los casos ilustrativos documentan la reproducibilidad de la técnica. Esta estructura es útil en contextos de recursos limitados, donde la sistematización de protocolos quirúrgicos puede contribuir a mejorar la seguridad operatoria y a generar evidencia local aplicable.

Conclusión

En esta serie retrospectiva de 20 pacientes con ANJ, el Protocolo EMGS-MURILLO mostró un perfil hemostático favorable, ausencia de transfusiones, baja frecuencia de complicaciones y ausencia de recurrencias durante el seguimiento consignado. La combinación de ligadura de la arteria carótida externa e infiltración intratumoral de TXA/H₂O₂ puede representar una estrategia quirúrgica factible en hospitales públicos con limitaciones tecnológicas. Sin embargo, los hallazgos deben interpretarse de acuerdo con el diseño retrospectivo, el tamaño muestral, la ausencia de grupo control y la necesidad de seguimiento prolongado. Se requieren estudios prospectivos, idealmente comparativos, para confirmar la seguridad, reproducibilidad y efectividad del protocolo.

Limitaciones

El estudio presenta limitaciones inherentes a su diseño retrospectivo, incluyendo riesgo de sesgo de selección, sesgo de información y dependencia de la calidad del registro clínico. El tamaño muestral reducido limita la posibilidad de realizar análisis inferenciales robustos. La ausencia de un grupo control impide establecer comparaciones directas con embolización preoperatoria, abordajes endoscópicos o resección abierta sin infiltración intratumoral. Además, la duración exacta del seguimiento debe incorporarse para fortalecer la interpretación de la recurrencia tumoral. Finalmente, el uso combinado de TXA/H₂O₂ requiere evaluación prospectiva antes de atribuirle efectos hemostáticos causales o generalizables.

Referencias

1. Neel HB, Whicker JH, Devine KD, Weiland LH. Juvenile angiofibroma Review of 120 Cases. *Am J Surg*. 1973;126(4):547–56. doi:10.1016/s0002-9610(73)80048-0 PubMed PMID: 4355257.
2. López F, Triantafyllou A, Snyderman CH, Hunt JL, Suárez C, Lund VJ, et al. Nasal juvenile angiofibroma: Current perspectives with emphasis on management. *Head Neck*. 2017;39(5):1033–45. doi:10.1002/hed.24696 PubMed PMID: 28199045.
3. Liang J, Yi Z, Lianq P. The nature of juvenile nasopharyngeal angiofibroma. *Otolaryngol - Head Neck Surg*. 2000;123(4):475–81. doi:10.1067/mhn.2000.105061 PubMed PMID: 11020189.
4. Paris J, Guelfucci B, Moulin G, Zanaret M, Triglia JM. Diagnosis and treatment of juvenile nasopharyngeal angiofibroma. *Eur Arch Oto-Rhino-Laryngol*. 2001;258(3):120–4. doi:10.1007/s004050100331 PubMed PMID: 11374252.
5. Nicolai P, Villaret AB, Farina D, Nadeau S, Yakirevitch A, Berlucchi M, et al. Endoscopic Surgery for Juvenile Angiofibroma: A Critical Review of Indications after 46 Cases. *Am J Rhinol Allergy*. 2010;24(2):e67–72. doi:10.2500/ajra.2010.24.3443 PubMed PMID: 20338105.
6. Giorgianni A, Molinaro S, Agosti E, Terrana AV, Vizzari FA, Arosio AD, et al. Twenty Years of Experience in Juvenile Nasopharyngeal Angiofibroma (JNA) Preoperative Endovascular Embolization: An Effective Procedure with a Low Complications Rate. *J Clin Med*. 2021;10(17):3926. doi:10.3390/jcm10173926 PubMed PMID: 34501374; PubMed Central PMCID: PMC8432214.
7. Overdevest JB, Amans MR, Zaki P, Pletcher SD, El-Sayed IH. Patterns of vascularization and surgical morbidity in juvenile nasopharyngeal angiofibroma: A case series, systematic review, and meta-analysis. *Head Neck*. 2018;40(2):428–43. doi:10.1002/hed.24987 PubMed PMID: 29130560.
8. Umar M, Aziz B, Akram S, Rehman AU, Ahmad J, Shahzad MAK. Reduced Blood Loss with Intraoperative Artery Ligation During Angiofibroma Excision. *J Soc Prev, Advocacy Res KEMU*. 2024;3(1):20–4. doi:10.21649/jspark.v3i1.406
9. Diebel ME, Martin JV, Liberati DM, Diebel LN. The temporal response and mechanism of action of tranexamic acid in endothelial glycocalyx degradation. *J Trauma Acute Care Surg*. 2018;84(1):75–80. doi:10.1097/ta.0000000000001726 PubMed PMID: 29040203.
10. McCormack PL. Tranexamic Acid. *Drugs*. 2012;72(5):585–617. doi:10.2165/11209070-000000000-00000 PubMed PMID: 22397329.
11. Zhu G, Wang Q, Lu S, Niu Y. Hydrogen Peroxide: A Potential Wound Therapeutic Target. *Méd Princ Pr*. 2017;26(4):301–8. doi:10.1159/000475501 PubMed PMID: 28384636; PubMed Central PMCID: PMC5768111.
12. Urban MV, Rath T, Radtke C. Hydrogen peroxide (H₂O₂): a review of its use in surgery. *Wien Med Wochenschr*. 2019;169(9–10):222–5. doi:10.1007/s10354-017-0610-2 PubMed PMID: 29147868.
13. project T jamovi. jamovi (Version 2.7) [Computer Software] [Internet]. 2025. Available from: <https://www.jamovi.org>
14. Pundir V, Pundir J, Georgalas C, Fokkens WJ. Role of tranexamic acid in endoscopic sinus surgery – a systematic review and meta-analysis. *Rhinol J*. 2013;51(4):291–7. doi:10.4193/rhino13.042 PubMed PMID: 24260760.
15. Kim DH, Kim S, Kang H, Jin HJ, Hwang SH. Efficacy of tranexamic acid on operative bleeding in endoscopic sinus surgery: A meta-analysis and systematic review. *Laryngoscope*. 2019;129(4):800–7. doi:10.1002/lary.27766 PubMed PMID: 30593688.
16. Herman P, Lot G, Chapot R, Salvan D, Huy PTB. Long-term follow-up of juvenile nasopharyngeal angiofibromas: Analysis of recurrences. *Laryngoscope*. 1999;109(1):140–7. doi:10.1097/00005537-199901000-00027 PubMed PMID: 9917056.
17. Fang R, Sun W, Shi J, Xu R, Peng L, Lai Y, et al. Risk factors and characteristics for recurrence of juvenile nasopharyngeal angiofibroma: A 22-year experience with 123 cases at a tertiary center. *Clin Exp Otorhinolaryngol*. 2022;15(4):364–71. doi:10.21053/ceo.2022.01053 PubMed PMID: 36177977; PubMed Central PMCID: PMC9723283.
18. Felippu AWD, Fontes EB, Felippu AWD, Ellery BC, Oliveira ACS de, Guimarães AV, et al. Juvenile Nasopharyngeal Angiofibroma: A Series of 96 Surgical Cases. *Int Arch Otorhinolaryngol*. 2023;28(03):e432–9. doi:10.1055/s-0043-1777293 PubMed PMID: 38974625; PubMed Central PMCID: PMC11226290.
19. Leong SC. A systematic review of surgical outcomes for advanced juvenile nasopharyngeal angiofibroma with intracranial involvement. *Laryngoscope*. 2013;123(5):1125–31. doi:10.1002/lary.23760 PubMed PMID: 23553370.

Regina Pacis **Sapientia** **Postgraduate**

Volumen 2, Edición 1.

Mayo 2026

<https://revistas.unicah.edu/>